



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

PÁJENÍ LASEROVOU DIODOU

LASER DIODE SOLDERING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MICHAL STRAKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR STEJSKAL

BRNO 2012

Zde bude vloženo zadání diplomové práce

ABSTRAKT:

Tato práce se zabývá problematikou pájení pomocí laserové diody. Teoretická část shrnuje obecné a získané poznatky o technologii pájení a materiálech, které se v tomto procesu vyskytují. Dále popisuje faktory, které ovlivňují spolehlivost pájeného spoje. Podrobněji se zabývá formováním pájeného spoje a strukturou intermetalické vrstvy.

Praktická část této práce je zaměřena na konstrukci zařízení pro pájení laserovou diodou a následné vytvoření vzorků, u kterých se porovná kvalita pájeného spoje proti kvalitě spoje vyhotoveného pomocí technologie (re-flow) přetavení v in-line peci. Porovnává se struktura a tloušťka intermetalické vrstvy, počet a tvar voidů v pájeném spoji.

ABSTRACT:

This work deals with the laser diode soldering. The theoretical part summarizes general and acquired findings about soldering technology and materials that occur in this process. It also describes factors that affect the reliability of solder joints. It is closely focused to the shaping of the solder joint and structure of intermetallic layer.

The practical part of this work is focused on the design of equipment for laser diode soldering and subsequent shaping of the samples. The quality of soldered joint is compared against the quality of joint created using re-flow technology - remelting in in-line smelter. The structure and thickness of the intermetallic layer, the number and shape of the voids in the solder joints are compared.

KLÍČOVÁ SLOVA:

pájení, pájený spoj, laserová dioda, teplotní profil, intermetalická vrstva, voidy, metalografický výbrus

KEY WORDS:

soldering, soldering joints, laser diode, temperature profile, intermetallic layer, voids, metallographic specimen

Bibliografická citace mé práce:

STRAKA, M. *Pájení laserovou diodou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Stejskal.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 24. 5. 2012

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Stejskalovi za pomoc, podněty a připomínky při plnění úkolů realizovaných během řešení diplomové práce.

Rád bych také poděkoval mým rodičům za podporu během studia.

V Brně dne 24. 5. 2012

.....

Obsah

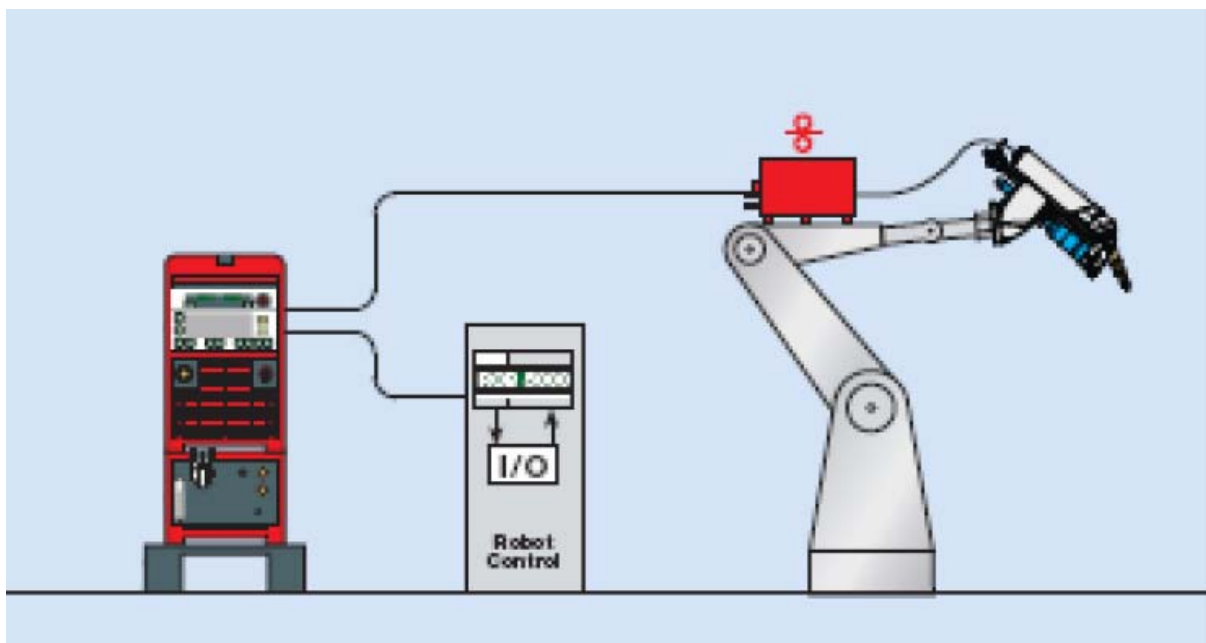
Úvod	8
1 Pájený spoj a pájky	9
1.1 Pájky a jejich formy	9
1.1.1 Požadavky na pájecí pastu a zásady při jejím používání	11
1.2 Bezolovnaté pájky	13
1.2.1 SAC305 – Bezolovnatá tyčová pájka [2]	15
1.2.2 SN100C (Sn/Cu/Ni) [2]	16
1.2.3 SN100Sb (Sn/Cu/Ni/Sb)	17
1.3 Olovnatá pájecí slitina Sn/Pb [2]	18
1.4 Voidy v pájeném spoji	18
1.4.1 Macro voidy	20
1.4.2 Micro voidy	20
1.4.3 Voidy v mikropropojích	20
1.4.4 Vliv teplotního profilu na tvorbu voidů	21
2 Povrchové úpravy	21
2.1 ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold)	21
2.2 OSP (Organic Solder Protectives)	21
2.3 HAL (Hot Air Levelling)	21
2.4 Imersní cín	22
2.5 Galvanické zlato	22
3 Techniky pájení	22
3.1 Pájení proudem horkého plynu	23
3.2 Pájení infračerveným zářením	24
3.3 Pájení laserem	24
3.3.1 Diodové lasery	25
3.3.2 YAG - pulsní lasery	26
3.3.3 Plynové lasery	26
4 Intermetalické vrstvy	27
4.1 Tvorba a růst intermetalické vrstvy	27
4.2 Intermetalické sloučeniny na rozhraní Sn – Cu	29
4.3 Intermetalická oblast a vliv na pevnost spoje	30
5 Analýzy vad	31
5.1 Tvorba mikrovýbrusů	31
5.2 Chemická analýza	32
5.3 Analýza rastrovacím elektronovým mikroskopem (REM)	32
5.4 Rentgenová difrakce (XRD)	32
6 Návrh zařízení	33
6.1 Volba laserové diody	33
6.2 Chlazení laserové diody	34
6.3 Návrh a realizace řídicího obvodu pro ovládání proudového zdroje	36
6.4 Návrh a realizace napájení laserové diody, řídicích a ovládacích obvodů	38

7	Popis, parametry a ovládání zařízení pro pájení laserovou diodou	40
7.1	Přední panel s ovládacími prvky	40
7.2	Pájecí hlava a její části	41
7.2.1	Šroubovací optika pro laserovou hlavu	42
7.2.2	Bezpečnost práce s laserovým zařízením	42
8	Experiment	43
8.1	Sestavení pracoviště pro pájení laserovou diodou.....	43
8.2	Programové nastavování výkonového profilu pro laserové pájení	45
8.3	Sladění teplotního profilu s výkonovým profilem.....	46
8.4	Výroba vzorků pájeného spoje pomocí zařízení pro pájení laserovou diodou.....	47
8.5	Výpočet integrálu dodané energie pájenému spoji pomocí zařízení pro pájení laserovou diodou.	48
8.6	Výroba metalografického výbrusu a vyhodnocení výsledků na mikroskopu.....	48
9	Závěr.....	50
10	Seznam použitých zdrojů	51
11	Seznam příloh	53

Úvod

Pájení je stále ještě nejčastější technika výroby elektronických sestav. Ale i tak má její používání mnoho úskalí, která přímo souvisejí se spolehlivostí konkrétního zařízení, primárně se spolehlivostí pájeného spoje. Spolehlivost pájeného spoje úzce souvisí s materiály, ze kterých se pájený spoj skládá. Jedná se o jednotlivé kovy obsažené v pájce, povrchové úpravě pájecí plošky a povrchové úpravě terminálu pájené součástky. Všechny tyto materiály se účastní vzniku pájeného spoje, potažmo intermetalických vrstev na rozhraní těchto materiálů. Tvorba intermetalických vrstev a vlastnosti pájeného spoje lze ovlivňovat mnoha faktory mezi, které patří i proces pájení, zejména teplotní profil.

Pájení pomocí laseru se již v některých aplikacích SMT používá. Odhaduje se, že asi v 5% všech případů. Velkou výhodou je velmi přesné lokální přetavení. To jasně ukazuje jednu z předností pájení laserem, které je vhodné k pájení materiálů citlivých na zvýšenou teplotu. Ohřev bývá velmi krátký, asi 3 ms, čímž se vylučuje vznik intermetalických struktur na pájeném spoji. Úzce směřovaný paprsek předurčuje laser na lokální pájení, tzn., že se paprskem pájí jedno pájené místo po druhém.



Obrázek č.1 Automatické laserové pájecí zařízení

1 Pájený spoj a pájky

Měkké pájení je proces metalurgického spojování kovových částí roztavenou pájkou, zpravidla za přítomnosti tavidel. Pájení součástek patří do kategorie měkkého pájení s pracovními teplotami do 450 °C. Při tomto fyzikálně chemickém procesu se atomy spojovaných kovů a roztavené pájky dostávají do velmi malých vzdáleností, přičemž dochází k účinkům adhezních (přilnavých) a kohezních (soudržných) sil. Při pájení probíhá difúze a rozpouštění některých prvků pájky i spojovaných materiálů. Na rozhraní mezi pájkou a pájeným povrchem vzniká tzv. intermetalická oblast se specifickými vlastnostmi. Chemická vazba uplatňující se při tomto způsobu spojení se nazývá kovová.

Předpokladem vytvoření kvalitního pájeného spoje je dobré smáčení pájených povrchů roztavenou pájkou, dodržení a udržení pracovní teploty a správné dávkování pájky. Množství pájky by mělo být jen takové, aby obrysy vodiče (vývodu součástky) byly pod vrstvou pájky zřetelné a povrch pájky v řezu spojem kolmém na desku byl dutý. Na okrajích spoje musí být patrný úhel smáčení menší než 15 stupňů. Ve spoji nesmí zůstat obnažený základní kov spojovaných částí – z pájených spojů se nesmí nic dodatečně odstříhovat, na povrchu nesmí zůstat ostré výstupky nebo známky znečištění.

Při zatékání pájky do spoje se uplatňuje princip kapilárního vztlínání podporovaného vytvořeným kapilárním tlakem. Na tento fakt je třeba dbát při konstrukci spoje, aby velikost mezer ve spoji odpovídala užitému způsobu pájení (ruční, strojní ponorem, vlnou, přetavením aj.). Zvětšení průřezu mezery má vždy za následek prodloužení celkové doby pájení a tím i větší tepelné namáhání součástek a desek.

1.1 Pájky a jejich formy

Podstatnou složkou měkkých pájek jsou těžké kovy s nízkou teplotou tavení, zejména cín, olovo, bizmut a zinek. Některé pájky obsahují i antimon a indium, stříbro, měď, nikl, železo. Většinou se jedná o dvou nebo tří složkové slitiny. Čisté kovy a složitější slitiny se používají pro zvláštní účely. Nejpoužívanější jsou pájky cínové – spojují se s téměř všemi kovy. Rovnovážný diagram dvousložkové slitiny cín – olovo se vyznačuje existencí eutektického bodu při obsahu 61,9% Sn, zbytek Pb, s teplotou tání 183,3°C. Některé příměsi negativně ovlivňují vlastnosti měkké pájky Sn/Pb – snižují její smáčivost, roztékavost, mechanickou pevnost, korozní odolnost aj. Odklon od optimálních pájecích podmínek způsobený znečištěním pájky je zvláště nežádoucí u strojního pájení.

Pájka jako pájecí slitina se připravuje v mnoha formách vhodných pro různé aplikace. Pro doplňování lání v pájecích strojích má tvar tyčí. Pro ručním pájení to je drát definovaného průměru s jádrem. Tvoří ho trubička s jednou nebo několika dutinami, které obsahují tavidlo (za studena v plastickém stavu) viz **obrázek č.2**.



Obrázek č.2 Pohled na trubičkovou pájku v řezu

Pro pájení přetavením se pájka připravuje ve tvaru drobných kuliček o průměru několika desítek mikrometru **obrázek č.3**. Ty spolu s tavidlem a dalšími příměsemi upravujícími viskozitu, roztékavost a lepivost tvoří pájecí pastu. Technologie využívající přetavení pájecí pasty má mnoho předností ve srovnání se strojním pájením vlnou. Hlavní výhodou je nanesení definovaného množství pájky a tavidla na pájený spoj a reprodukovatelnější kvalita spoje. Základem je volba vhodné pájecí pasty i technologie zpracování. Na pájecí pasty jsou kladeny stále vyšší požadavky v závislosti na vyšších zástavbových hustotách, rychlejších procesech montáže i teplotních požadavcích, které musí splňovat teplotní profil. Z hlediska chování se pájecí pasta řadí do kategorie viskózně-elastických kapalin a její chování je charakterizováno reologickými vlastnostmi, které jsou podmíněny složením pasty. Pro různé aplikační techniky pájecí pasty se volí následující viskozity s rozdílným množstvím kovu viz **tabulka č.1**.

Tabulka č.1 Rozdělení pájecích past

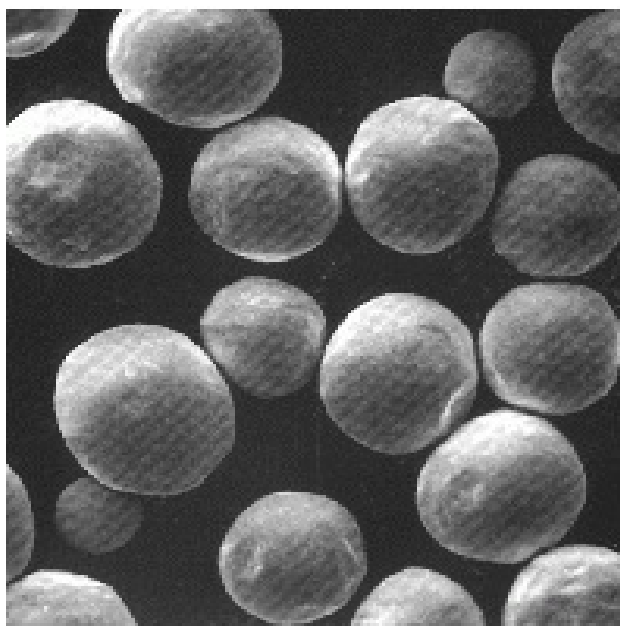
TECHNIKA NANÁŠENÍ	VISKOZITA	PODÍL KOVU
dávkoř	200-450 Pa.s	82-86 hm.% kovu
sítotisk	400-700 Pa.s	86-89 hm.% kovu
šablonový tisk	600-1.000 Pa.s	90-92 hm.% kovu

1.1.1 Požadavky na pájecí pastu a zásady při jejím používání

Pájecí pasty jsou používány výhradně pro SMT při pájení přetavením. Vlastní složení je kovová slitina pájky ve formě jemného prášku dokonale homogenizovaná s vhodným typem tavidla, tato substance musí splňovat několik základních požadavků, z nichž nejdůležitější jsou uvedeny v **tabulce č.2**.

Tabulka č.2 Tabulka základních požadavků na pájecí pastu

- sférický tvar kovových částecek
- nesmí obsahovat podlouhlé tvary
- povrch částic musí být hladký
- největší průměr částic 40 μm
- nejmenší průměr částic > 8 μm
- max. přípustný obsah oxidů 250 ppm
- po nanesení musí udržet původní tvar, nesmí se roztékat do plochy (tixotropie)



Obrázek č.3 Pohled na pájecí pastu při 500 násobném zvětšení

Použité tavidlo nesmí způsobovat oxidaci v místě nanesení se kterým je pasta po aplikaci v kontaktu i několik hodin. Toto riziko koroze má být před použitím pasty testováno takzvaným testem měděného zrcadla (na vyleštěnou Cu desku se nechá působit vzorek zkoumané pasty po definované době a hodnotí se zanechaná stopa v místě styku).

Po přetavení se musí slévat do jednolitého tvaru bez nebo s minimálním vznikem doprovodných kuliček přetavené pájky. Zkoumá se testem zrnění (balling test). Vzhledem k tomu, že pájecí pasta je velmi delikátní substance nezanedbatelné ceny, lze pro její používání a skladování doporučit dodržování předepsaných pravidel:

- Skladovat na čistém a suchém místě se sníženou teplotou kolem 5°C a v originálním obalu. Pájecí pasta se skládá z různých složek s velmi rozdílnou specifickou hmotností, takže má značnou tendenci k takzvané "separaci", tj. rozvrstvení jednotlivých složek dle specifické hmotnosti. Takto "separované" pastě již nelze vrátit původní vlastnosti a je tedy nepoužitelná i po opětovném promíchání. Přinejmenším ztratí svoji původní tixotropičnost, která je jednou z nejdůležitějších vlastností pasty. Při snížené teplotě se zvýší viskozita tekutých složek a těžká kovová zrnka jsou fixována.
- Po vyjmutí z chladu je nutné temperovat pastu v uzavřeném obalu na teplotu okolí nejméně 24 hod. Zamezí se tím vysrážení okolní vlhkosti na povrchu pasty a tím i její kontaminace H₂O.
- Pro odebrání pracovní dávky pasty použít čistou lžici z inertního materiálu (polyethylen, Teflon a p.). Kovové předměty nesmí s pastou přijít do styku.
- Zásobní balení ihned po odebrání pasty těsně uzavřít a uložit zpět do chladu.
- Při nanášení pasty sítím či šablonou používat pro stěr nejmenší možné množství pasty. Při několikrát opakovaném stěru téže dávky pasta ztrácí tixotropičnost.
- Přebytečnou pastu ze síta nikdy nevracet k původnímu obsahu.
- Ztuhlou a přestálou pastu nelze ničím rozředit. Je nepoužitelná. Skladuje se vždy jen takové množství, aby nebyla překročena doba expirace uvedená na obalu. Při nákupu je nutné se přesvědčit o čerstvosti zboží. Nakupuje se výhradně ve velkoobchodech, kde je větší odbyt a rychlejší obrát zásob
- Desky s aplikovanou pájecí pastou před procesem pájení neskladovat v chladničce, ale na suchém místě při pokojové teplotě.
- Výrobci past udávají instrukce pro takzvané zasušení pasty, která pak vykazuje lepší výsledky při procesu pájení.

- Při přejímce většího množství pasty se doporučuje vstupní kontrola vč. odpovídajících testů kvality (mirror test, balling test atd.).

Tabulka č.3 Tabulka s procentuálním poměrem prvků v pájce

Prvky		Sn	Pb	Cu	Ni	P	Ag	Bi	Ge
SC-systém	SC	R		0.7					
SCN-systém	SCN	R		0.7	0.05				
	SN100C	R		0.7	0.05				0.01
	SCNP	R		0.5	0.05	0.05			
SCA-systém	SC0.3A	R		0.7			0.3		
	SCAB	R		0.7			0.3	0.1	
SAC-systém	S3A0.5C	R		0.5			3.0		
SP-systém	S37P	R	37						

1.2 Bezolovnaté pájky

Nasazení bezolovnatých pájek ve výrobě se stalo aktuálním po zařazení olova mezi 10 nejnebezpečnějších prvků pro lidské tělo. Bezolovnaté pájky mají větší podíl cínu ve slitině a potřebují vyšší teplotu pájení, k tomu mají větší tendenci k oxidaci.

Je skutečností, že přechod na bezolovnaté pájky s sebou přináší řadu změn a nových faktorů, a bezpochyby i zásah do technologického procesu respektive do procesu pájení. Kromě odlišných vlastností je podstatná i skutečnost, že použití bezolovnatých pájek prozatím přináší také zvýšení nákladů.

Většina bezolovnatých slitin je dražší, než klasická pájka Sn/Pb. Pro bezolovnaté pájky je v převážné většině slitin nutná přítomnost minimálně 60% Sn a zbytek je doplňován většinou drahými kovy. Cena slitiny je závislá na ceně jednotlivých složek a odvíjí se od dostupnosti obsažených prvků. Dostupnost a cena každého prvku je pak závislá na velikosti jeho celosvětových zásob.

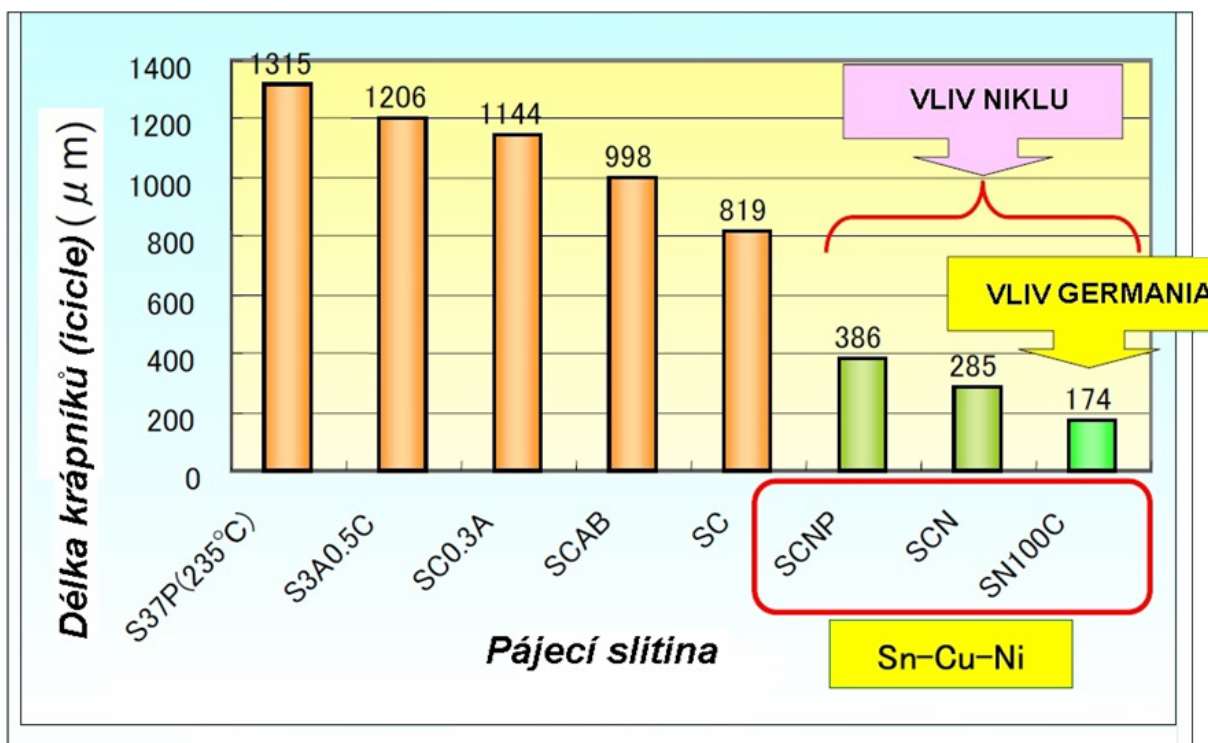
Při návrhu nového typu pájky musí být uváženo mnoho různých aspektů. Nejdůležitější technické parametry jsou smáčivost a dostatečná mechanická pevnost. Pro elektroniku je důležitá elektrická a tepelná vodivost. Další podstatný aspekt, zvláště pro elektroniku je, že teplota tání musí být nízká, aby se zabránilo poškozování konstrukce nebo součástek během pájení. Legující prvky musí být dostupné v dostatečném množství a nesmí být ekologicky nebezpečné nebo jedovaté a musí mít pochopitelně také rozumnou cenu.

Z výše uvedených důvodů mohou být Sn/Pb pájky pravděpodobně nahrazeny jinou slitinou na bázi cínu. Slitiny s eutektickým nebo blízko eutektickému složení byly vybrány

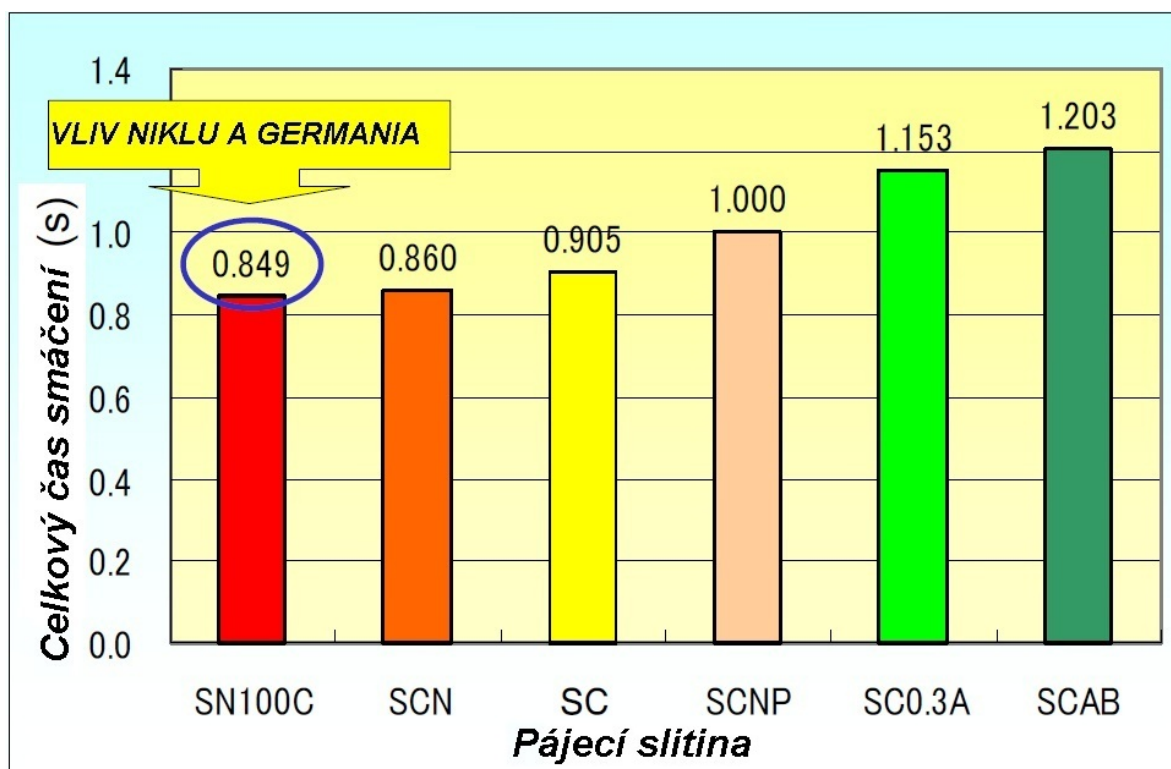
kvůli jejich úzkému intervalu tuhnutí. Slitiny Sn99.35Cu0.6Ni0.5, Sn99.16Cu0.6Sb0.2Ni0.04, Sn96.5Ag3.0Cu0.5 se ukázaly jako osvědčené. Důležité vlastnosti těchto slitin, nahrazující cín a olovo, jsou smáčivost, teplota tavení, mechanické vlastnosti a také rezistivita.

Bezolovnaté pájky snáze vytvářejí kuličku pájky, než se roztékají oproti eutektické Sn/Pb. Příčina je v rozdílných povrchových napětích a rovnováze mezifázových napětí smáčených ploch, úrovni oxidace, reakci s podkladovým materiálem a únavovou odolností materiálu.

Tavidlo je kapalná, plynná nebo pevná látka, která při ohřátí zrychluje nebo podporuje smáčení povrchů pájených materiálů pájkou **obrázek č.5**. Tavidla pomáhají za působení tepla odstranit z povrchu pájeného materiálu oxidy, nečistoty a chrání jej i proti oxidaci během procesu pájení. Reakce tavidla s oxidy zapříčiní zvýšení povrchového napětí pájeného povrchu a tím zlepšení smáčivosti. Přísady, pomocí kterých dosahujeme dobrých pájecích výsledků se nazývají aktivátory. [1]



Obrázek č.4 Graf porovnání pájecích slitin při icicle testu



Obrázek č.5 Graf rychlosti smáčení různých pájek

1.2.1 SAC305 – Bezolovnatá tyčová pájka [2]

Složení: Sn96,5/Ag3,0/Cu0,5

Vlastnosti:

- nejlevnější slitina ze skupiny Sn/Ag/Cu,
- nízký bod tavení (217 °C - 218 °C),
- slitina Sn/Ag/Cu s nejlepším smáčením,
- slučitelnost se všemi typy tavidla,
- vynikající spolehlivost pájeného spoje,
- vynikající odolnost vůči únavě.

SAC305 je bezolovnatá slitina, která obsahuje 96,5 % cínu, 3 % stříbra a 0,5 % mědi. Tato slitina spadá pod doporučení JEIDA – (Sdružení japonských vývojářů elektroniky) pro

bezolovnaté pájení. SAC305 je blízká náhradě za slitinu 63Sn/37Pb pro pájení vlnou a ruční pájení, vyniká svoji velmi dobrou dlouhodobou stabilitou v technologiích SMT. Při pájení vlnou slitina SAC305 produkuje méně strusky než jiné pájecí slitiny, zajišťuje dobré smáčení a vynikající pevnost spoje. Slitinu SAC305 je možno používat ve stávajícím zařízení, procesech, v kombinaci se stávajícími povlaky a chemickým složením tavidel. Slitina SAC305 se dodává ve formě tyčí, drátu s jádrem, pevného drátu, fólie, předem formovaných prvků, prášku a vodou rozpustných a kalafunových pájecích past, nevyžadujících čištění.

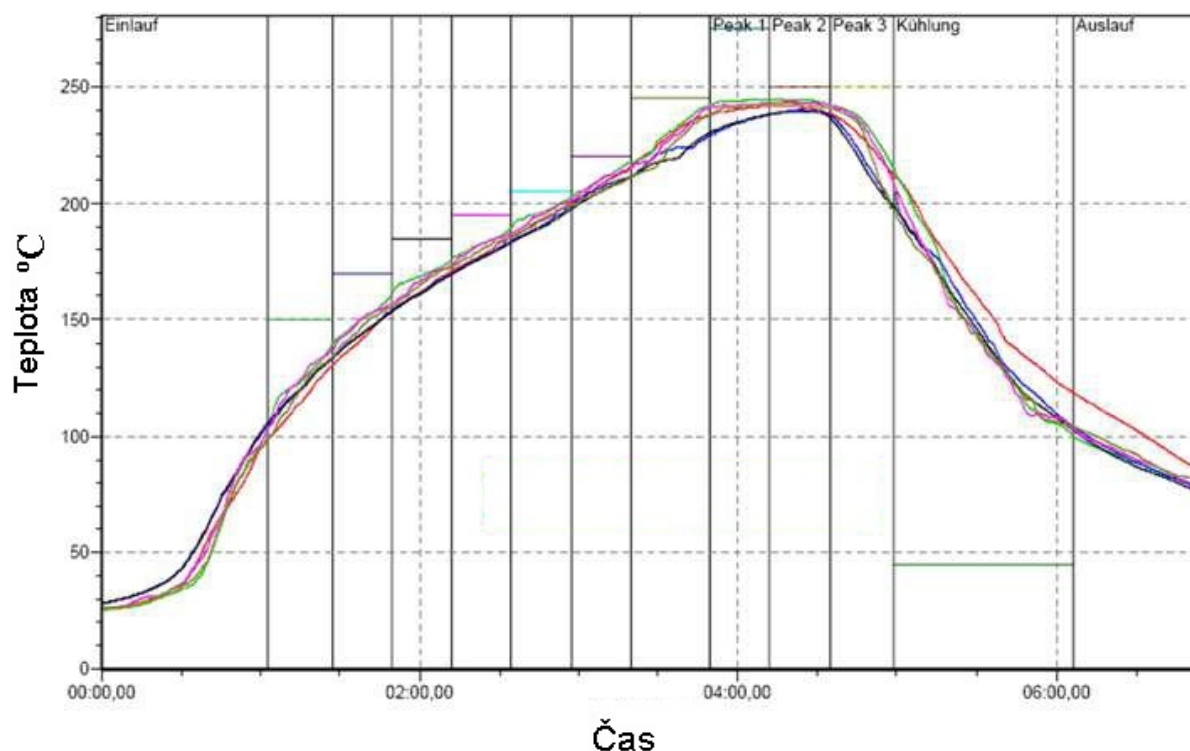
1.2.2 SN100C (Sn/Cu/Ni) [2]

Složení: Sn99,35/Cu0,6/Ni0,5

Slitina SN100C je eutektickou slitinou s bodem tavení 227 °C. Slitina je mnohem tvárnější v porovnání se slitinou SAC305 a při jejím používání je rovněž i menší tvorba strusky. Slitiny SN100 byly vyvinuty jako alternativy k SAC305. Důvodem byla cena, protože stříbro obsažené v SAC zvyšuje cenu pájecí slitiny. Slitina SN100C je navíc méně agresivní vůči materiálům používaným v pájecí vlně a mnohem méně se v ní rozpouští měď. Jejich použití je ideální pro hromadné pájení. Nevýhodou je výrazně vyšší pájecí teplota.

Vlastnosti:

- teplota pájení (226 °C – 227 °C),
- eutektická slitina,
- pájení bez můstků a rampouchů,
- hladké, lesklé, dobře tvarované kužely, bez ohledu na rychlost ochlazování,
- dobrý průnik průchozím otvorem,
- dobré utváření kuželu na horní straně,
- tvorba strusky stejná nebo nižší než u pájky Sn/Pb,
- nevyžaduje dusíkovou atmosféru,
- nízká míra louhování mědi usnadňuje řízení obsahu mědi v pájecí lázni.



Obrázek č.6 Teplotní profil pro pájku SN100C (reflow)

SN100C je bezolovnatá pájecí slitina, která obsahuje cín, měď a malé množství niklu. Vyniká pomalým a rovnoměrným růstem intermetalické vrstvy na rozhraní pájky a substrátu. Funguje dobře i při selektivním pájení a pájení namáčením. Výsledkem těchto vlastností je, že nabízí vysokou produktivitu ve srovnání s ostatními bezolovnatými pájecími slitinami. Teplotní profil pro tuto pájku je znázorněn na **obrázku č.6**.

1.2.3 SN100Sb (Sn/Cu/Ni/Sb)

Složení: Sn99,16/Cu0,6/Sb0,2/Ni0,04

Vlastnosti:

- teplota tavení (226 °C - 227 °C), ideální pro proces pájení vlnou,
- eutektická slitina,
- pájení bez můstků a rampouchů,
- hladké, lesklé, dobře tvarované kužely, bez ohledu na rychlost ochlazování,
- dobrý průnik průchozím otvorem - lepší než u ostatních slitin,
- dobré utváření kuželu na horní straně,

- tvorba strusky stejná jako u slitiny SN100C,
- nevyžaduje dusíkovou atmosféru,
- nižší agresivita vůči nerezové oceli a jiným materiálům pájecí lázně ve srovnání se slitinami Sn/Ag/Cu.

SN100Sb je bezolovnatá pájecí slitina, která obsahuje cín, měď a malé množství antimonu a niklu. SN100Sb nabízí vynikající vlastnosti pro hromadné pájení vlnou. Podobně jako u pájky SN100C je dobrá odolnost vůči tepelné únavě. Vlastnosti hodně podobné jako u Sn/Pb. Pomalý a rovnoměrný růst intermetalické vrstvy na rozhraní pájky a substrátu. Vzhledem k tomu, že proces přetavení bezolovnaté pájky probíhá v daleko užším rozmezí teplot, než je tomu u klasických olovnatých pájek (procesní okno je užší), je třeba, aby pájecí vlny či pece pro pájení přetavením fungovaly s mnohem vyšší přesností. V případě pájení přetavením, které dnes v technologii povrchové montáže převládá, je proto vhodné použít pece s urychleným prouděním, kde lze snadněji kontrolovat teplotu i při vyšších hodnotách. Řada dodavatelů bezolovnatých past rovněž doporučuje použití dusíkové ochranné atmosféry. Ta redukuje tvorbu oxidů v pájeném spoji, a tím výrazně podporuje nejen lepší smáčivost, ale v konečném provedení i vyšší jakost pájeného spoje. Jelikož spoje vytvářené užitím bezolovnatých pájek jsou vzhledově matnější, než spoje vytvářené pájkami Sn/Pb, lze v ochranné dusíkové atmosféře částečně potlačit i tento vzhledový jev.

1.3 Olovnatá pájecí slitina Sn/Pb [2]

V elektrotechnice se používá často pájka skládající se z podílu (60 – 63) hmotnostních % cínu Sn a (40-37) hmotnostních % olova Pb díky svým specifickým vlastnostem:

- teplota tavení slitiny (183 – 189)°C vyhovuje z hlediska návrhu (používané součástky a substráty), technologického procesu i běžných pracovních teplot elektronických zařízení,
- cín vykazuje velmi dobré smáčecí charakteristiky, oxidy cínu lze odstranit relativně málo aktivovanými tavidly,
- pájecí slitina nevytváří křehké intermetalické fáze.

1.4 Voidy v pájeném spoji

Přechod na bezolovnaté pájky s sebou přinesl několik problémů, které se u olovnatých pájek vyskytovaly také, ale rozhodně v menší míře. Jedním z nich je zvýšená tvorba voidů - dutin (dále v textu voidy) ve spoji. Následkem jejich zvýšené tvorby může docházet

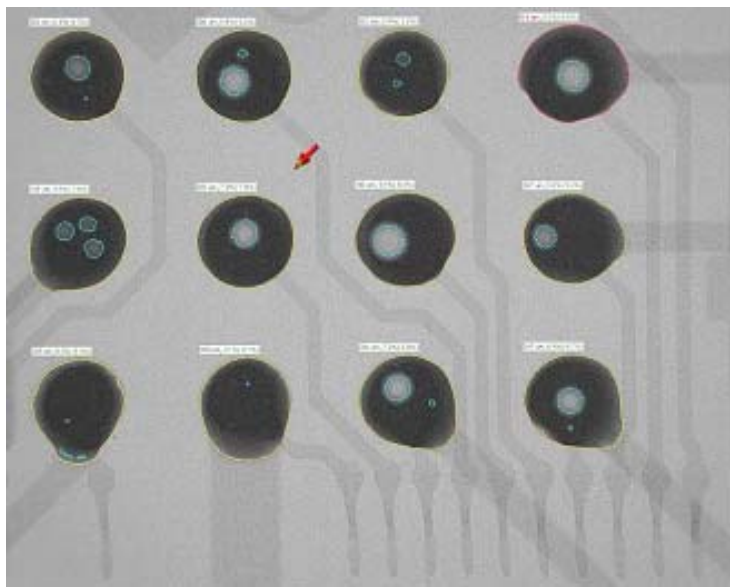
k problémům se spolehlivostí pájených spojů a tím i celého zařízení, zejména při tepelném namáhání nebo v případě, že zařízení bude vystaveno vibracím. Dutiny byly zaznamenány u všech typů spojů. Důvodů proč se voidy u bezolovnatých pájek tvoří více je několik:

- větší povrchové napětí u bezolovnatých pájek,
- vyšší přetavovací teploty,
- snížená rychlost smáčení,
- častější použití agresivnějších tavidel ve slitinách.

Akceptovatelná velikost voidů ve spoji je sice určena, ale výrobci si případně mohou sami podle potřeby jejich vlastního výrobku určit jaké množství a velikost voidů je vhodné. Norma IPC-A-610D udává že:

- akceptovatelné množství velikosti voidu je 25% a méně u snímků pořízených elektronovým mikroskopem,
- více než 25% velikosti je označeno jako defekt.

V pájeném spoji můžeme nalézt několik typů voidů, které se liší velikostí a částečně i vznikem.



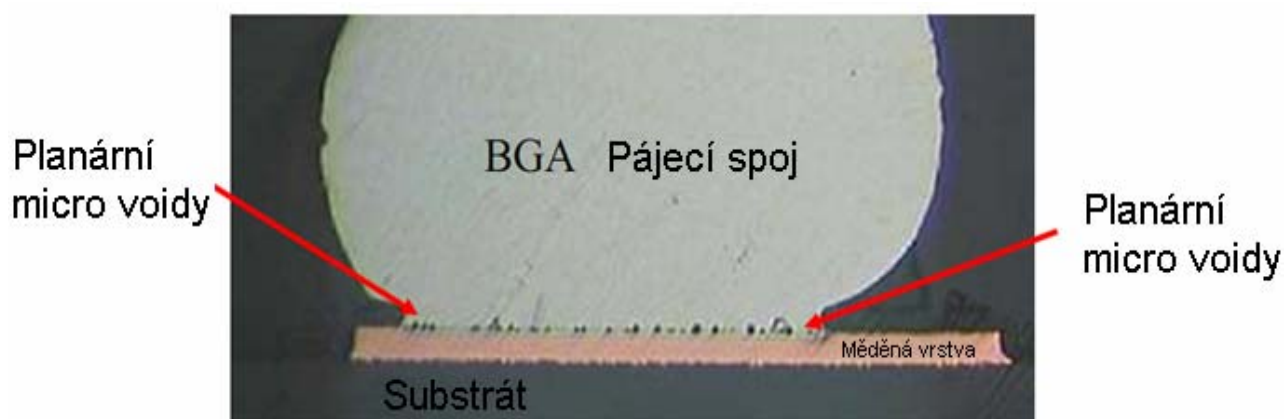
Obrázek č.7 Kontrola pájených spojů rentgenem [3]

1.4.1 Macro voidy

Vznik makro voidů je způsoben těkavými složkami pájky, které se vypařují během pájení a které nejsou schopny z roztaveného kovu uniknout před jeho zatuhnutím. Zdrojem těchto látek jsou rozpouštědla a tavidla, která jsou přítomna v pájecí pastě, a jež mají zlepšovat vlastnosti pájky. Na vznik voidů má vliv spousta faktorů, z nichž nejvýznamnější je, jak vyplývá z mechanismu jejich vzniku, složení pájecí pasty a následně pak přetavovací profil.

1.4.2 Micro voidy

Tento typ voidů je umístěn na rozhraní pájecí plošky a pájky nad intermetalickou vrstvou, která se vytváří při pájení (Obr. 5). Jsou v průměru menší než 1-2 mils. Počet těchto dutin je vždy vyšší a nachází se všechny v jedné rovině. Protože se jedná o skupinu dutin umístěných v jedné rovině, působí tak na pevnost spoje tím, že urychlují praskání pájky během tepelného nebo mechanického namáhání [3]. Příčina jejich vzniku spočívá v rozdílném difuzním koeficientu materiálu na rozhraní pájka a pájecí ploška. Sousední sloučeniny nebo fáze se mění, objem jedné roste a ostatní se redukují. Např. měď z povrchu pájecí plošky difunduje do (na cín bohaté) pájky rychleji než je tomu naopak. Kvůli této nevyvážené difuzi mědi do cínu vznikají micro voidy. Bylo také zjištěno, že převládají v případě, kdy základní měděný substrát má hrubou topografii a nadměrnou vrstvu stříbra [3].



Obrázek č.8 Micro voidy na rozhraní padu a pájky

1.4.3 Voidy v mikropropojích

Mikropropoje jsou pokovené cesty, jejichž průměr je menší než 150 μm . Využívají se pro zmenšení rozměrů desky a snížení hmotnosti i počtu vrstev desky. Problémem je, že se ve

spojení BGA a mikropropojů tvoří velké množství voidů. Ty vznikají tím, že pájka nesmočí měděný povrch uvnitř cesty, čímž vznikne vzduchová bublina. Z výsledků studie [3], ve které byly porovnávány bezolovnaté spoje s vyplněnými a nevyplněnými mikropropoji a spoje bez mikropropojů, vyplývá, že nejméně voidů se tvoří u vyplněných mikropropojů.

1.4.4 Vliv teplotního profilu na tvorbu voidů

Teplotní profil je jednou z možností, jak snížit počet vzniků voidů ve spoji. Stejně jako v případě makro voidů zde má vliv maximální teplota a strmost profilu. Vyšší teplota zvyšuje přítomnost voidů ve spoji. Menší výskyt je dán tím, že při vyšší teplotě se tavidlo vysouší rychleji a zvyšuje se tak viskozita a bude tak větší šance, že uvnitř pájky zůstane uzavřen plyn.

2 Povrchové úpravy

Povrchová úprava mědi se používá jako ochrana před oxidací povrchu, zajištění dlouhodobé skladovatelnosti a také ke zlepšení pájitelnosti povrchu. Používají se pokovovací metody a metody pokrytí organickými povlaky. Tyto úpravy musí vyhovovat požadavkům následné montáže. Tato tzv. aktivní povrchová úprava mění funkční skupiny na měděném povrchu a tedy i chemismus povrchu. V **tabulce č.4** je srovnání používaných povrchových úprav.

2.1 ENIG (*Electroless Nickel Immersion Gold*)

V lázni, do které se přidává paladium, se na odhalený povrch chemicky nanese sloučenina niklu. Zlato se poté nanáší imersně bez přítomnosti redukčních činidel a elektrického proudu. Paladium obsažené v lázni způsobuje menší smáčivost.

2.2 OSP (*Organic Solder Protectives*)

Chemická metoda nanášení organických inhibitorů oxidace mědi na odhalený povrch desky plošných spojů, zpravidla po tisku nepájivé masky. Používá se především na jednostranné desky, dosahuje výborné rovinatosti povrchu, oproti HALu je levnější až o 40%. Spolehlivost spojů je srovnatelná s HAL, nevýhodou je krátká doba doporučené skladovatelnosti a rozdílné vlastnosti OSP povrchů od různých výrobců.

2.3 HAL (*Hot Air Levelling*)

Jedná se o metodu, při které se deska ponoří do Sn/Pb nebo do bezolovnaté pájky a následně se přebytek pájky zarovná horkým proudem vzduchu. Vrstva je stabilnější než povlak cínu a slouží jako povrchová ochrana měděného povrchu proti oxidaci. Jedná se

ovšem o energeticky náročný proces. Deska je zatěžována velkým teplotním šokem a výsledná rovinnost povrchu je velmi špatná. S ohledem na ekologické normy je možné použít místo Sn/Pb bezolovnatou pájku, tím ovšem dochází k většímu namáhání desek vzhledem k nutnosti použití vyšších teplot.

2.4 Imersní cín

Cín je nanášen chemickou cestou. Deska je ponořena do roztoku chemického cínu a tím vznikne povrch cínu, který je nejlépe smáčivý cínovou pájkou, cenově dostupný, technologicky poměrně nenáročný a ekologicky vyhovující.

2.5 Galvanické zlato

Na povrch desky je za pomoci elektrolýzy nanesen povrch zlata. Vytvořená vrstva je dostatečně rovinná vhodná i pro bondování. Metoda galvanického zlacení je velice kvalitní v mnoha směrech a dává plošnému spoji i značnou estetickou váhu

Tabulka č.4 Porovnání různých typů povrchových úprav

Povrchová úprava	HAL	NiAu	OSP	chem. Ag	chem. Sn
Vícenásobný teplotní cyklus	Ano	Ano	Probl.	Ano	Ano
Rovinnost povrchu	Ne	Ano	Ano	Ano	Ano
Tloušťka vrstvy [μm]	1 – 20	5	0,5	0,16	0,1
Fine pitch aplikace	Probl.	Ano	Ano	Ano	Ano
Kontaktování	Ne	Ano	Ne	Ano	Ne
Teplotní stres na 65°C	Ano	Ne	Ne	Ne	Ne
Údržba lázně	Obtížná	Střední	Snadná	Snadná	Snadná
Řízení procesu	Střední	Obtížné	Snadné	Snadné	Snadné
Náklady	Střední	Vysoké	Nízké	Střední	Nízké
Ekologické aspekty	Špatné	Dobré	Dobré	Dobré	Dobré
Bezolovnatá pájka SnAgCu	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje

3 Techniky pájení

Správná volba pájecího procesu s optimálně nastavenou procesní charakteristikou v teplotně časové ose je dalším předpokladem formování spolehlivého pájeného spoje. Procesní charakteristiky musí být nastaveny adekvátním způsobem pro použitý materiálový

systém, velikosti součástek a typy pouzder, pro odpovídající zástavbovou hustotu i tepelnou kapacitu DPS i pro environmentální systém.

Nastavený teplotní profil v přetavovací peci musí respektovat typickou teplotu procesu udávanou jako vrcholovou T_p (T_{peak}) pro aplikovaný typ pájecí slitiny superponovanou na výrobcem doporučovaný teplotní profil použitého tavidla, nebo přímo výrobcem doporučovaný teplotní profil pájecí pasty. Dále je třeba zohlednit maximální doporučované teplotní odolnosti zpracovávaných součástek i DPS.

Pájení přetavením je způsob při kterém se před vlastním procesem na povrchu pájených předmětů nanese potřebné množství pájecí pasty. Po přiložení pájených míst k sobě se pájka v této pastě roztaví a vznikne pájený spoj. Operace dodání pájky a ohřev spoje jsou od sebe prostorově i časově oddělené. Ohřev se děje tepelným zářením, odporovým teplem, horkým plynem, předáním kondenzačního tepla aj. K uchycení součástek pro povrchovou montáž na desky se využívá lepidlového účinku pájecí pasty. S ohledem na provedení vývodů na některých součástkách pro povrchovou montáž, které jsou vyrobeny ze slitiny stříbra, je používáno pájky snižující rozpouštění stříbra ve složení $Sn62Pb36Ag2$, jinak většinou eutektické pájky $Sn63Pb$. Na připojovací plošky je pájecí pasta nanášena sítotiskem, tiskem přes šablonu, dávkovačem (dispenzerem) nebo jehlou.

3.1 Pájení proudem horkého plynu

Při pájení horkým plynem se teplo potřebné pro přetavení pájky získá průchodem tlakového plynu, nejčastěji vzduchu nebo dusíku, ohřívacím zařízením. Množství tepla je regulováno jednak teplotou, jednak rychlostí proudění plynu. Při ručním pájení je horký plyn usměrňován tryskou na požadované místo. Tryska má průměr asi 2 mm, průtok plynu je malý asi 1 až 5 l/min. Teplota na výstupu trysky je 350 °C až 400 °C. Při pájení více vývodových pouzder musíme zajišťovat kontinuální rovnoměrný pohyb trysky po všech pájených vývodech. Jsou-li rozměrné součástky chladné (na teplotě 20 °C až 25 °C) trvá proces pájení až několik jednotek a desítek vteřin. Pokud jsou pájené předměty předehřáté na teplotu asi 100 °C až 150 °C proběhne pájecí proces rychleji.

Pájení horkým plynem se využívá především k opravám, kde je výhodné lokální ohřívání. Bezdotykové trysky mohou být uspořádány do podlouhlých štěrbin, takže lze ohřívat celé řady vývodů současně. U plochých pouzder nebo u čtvercových pouzder se tak ohřívají všechny vývody jednoho integrovaného obvodu. Kromě toho je ohřev horkým plynem (vzduchem) často používaným způsobem ohřevu řadových pájených spojů v opravářské technice při vyjímání pouzder FP, QFP. Obvod je přitom přichycen vakuovou pipetou, takže v okamžiku roztavení pájky je součástka zvednuta a ohřev je ukončen.

3.2 Pájení infračerveným zářením

Energie, kterou dochází k přetavení pájecí pasty, se na montážní celky dostává zářením z IR zářičů. Množství tepla, které je absorbováno závisí na koeficientu, jehož velikost souvisí s barvou povrchu a vlnovou délkou záření. Obecně lze konstatovat, že absorpce záření se vzrůstající vlnovou délkou klesá. Při pájení infračerveným zářením nastává jev, kdy součástky s tmavším povrchem jsou více zahřívány, než místa, kde se nachází pájecí pasta. Dochází tedy k nerovnoměrnému rozložení teploty na povrchu desky plošného spoje, což má vliv na kvalitu pájení a tepelné namáhání součástek. Pájení probíhá zpravidla v průběžných infračervených pecích, kde jsou zářiče nad i pod dopravníkovým pásem. Zářiče jsou umístěny v jednotlivých sekcích, tzv. zónách. Požadovaný teplotní profil se nastavuje zpravidla mikroprocesorovým systémem, s nastavením teploty jednotlivých zón a rychlostí pohybu dopravníku. Pro prototypovou/malosériovou produkci se používají i vsázkové pece, kde je DPS upevněna v rámečku a požadovaný teplotní profil se nastavuje časovým průběhem teploty. Teplotní profily pro pájení nebo vytvrzování SMD celků jsou rozdílné, závisí na typech pájecí pasty eventuálně lepidla, na zástavbové hustotě, typu montážní a propojovací struktury i sestavy, velikosti DPS aj. Pro vytvrzení lepidla jsou někdy IR pece vybaveny doplňkovým UV modulem.

3.3 Pájení laserem

Laserové záření je koherentní, monochromatické a polarizované elektromagnetické vlnění z optické části spektra. Paprsky laserového záření mají minimální rozptyl a je možné je zaostřit na velmi malou plochu, proto jsou vhodné na přenos informací pomocí optických kabelů na velké vzdálenosti a pro použití v mikroelektronice. Jako zdroje laserového záření jsou nejčastěji používány polovodičové laserové diody.

Přetavení pájecí pasty (trubičkové pájky) zajistí programově řízený laserový paprsek. Laserové pájení lze zařadit do kategorie přenosu tepla pomocí infračerveného záření. Precizní výsledky jsou dány jak přesným množstvím energie, tak i přesným určením polohy laserového paprsku $\pm 80 \mu\text{m}$. Laser se často používá pro formování spojů speciálních vlastností (pájecí slitina Au80Sn20 s teplotou tavení 280 °C). Pájí se vývodové součástky, SMD i TAB.

- **výhodou** je minimální teplotní ovlivnění součástek, používání relativně velkých pájecích teplot, možnost použití rozdílných pájek, velká flexibilita procesu,
- **nevýhodou** je relativně vysoká cena a nízká rychlost (produktivita).

3.3.1 Diodové lasery

Laserová dioda (LD) je polovodičová součástka s PN přechodem, která vyzařuje záření při průchodu proudu v propustném směru. Struktura laserové diody je složitější než struktura luminiscenční diody (LED). Při nízkých hodnotách proudu se laserová dioda chová jako LED dioda a vyzařuje nekoherentní záření, ale při dosažení prahového proudu I_{TH} (threshold current) a jeho překročení proběhne na PN přechodu stimulovaná rekombinace nosičů náboje a dioda začne vyzařovat koherentní (laserové) záření, které je závislé na velikosti protékajícího proudu.

Laserové diody jsou teplotně závislé součástky. Při zvyšování teploty narůstá prahový proud I_{TH} , to znamená, že výstupní výkon laserové diody je kromě velikosti protékajícího proudu závislý i na teplotě PN přechodu, který se při činnosti laserové diody vlivem ztrát zahřívá. Pro udržení stálého výstupního výkonu je nutné teplotu PN přechodu stabilizovat a to buď omezováním proudu procházejícím laserovou diodou, nebo použitím adekvátního chlazení.

Pro teplotní stabilizaci laserové diody typu CCP (Conduction Cooled Package) se nejčastěji používají pasivní nebo aktivní chladiče, které jsou připevněny přímo na kovovém pouzdře laserové diody což je možné použít u málo výkonných laserů do 5 wattů výkonu, pro výkonnější typy laserů se častěji používají Peltierovy články 10-15 wattů. Pro lasery určené k pájení, svařování a řezání je nutné použít chlazení kapalinou nebo LNCS (Liquid Nitrogen Cooling System) - chlazení kapalným dusíkem. Tyto lasery pak mohou dosahovat výstupního výkonu od desítek wattů po jednotky kilowattů.

Pro pájení byly nejprve používány pevnolátkové Nd:YAG lasery, pracující na vlnové délce 1064 nm, kde při dané vlnové délce docházelo k příznivé absorpci v materiálu pájky. Vedle těchto laserů přicházejí v poslední době do obliby i výkonové diodové lasery s vyzařováním na vlnové délce 780 až 980 nm, které mají hned několik předností. Odlišný je i profil paprsku, kdy oproti kruhovému profilu, obvyklému u jiných typů laserů, jde zde spíše o pravoúhlý průřez s téměř konstantním rozložením intenzity záření. Ten technologii pájení dobře vyhovuje a při správném směřování paprsku umožňuje předejít pájených míst ještě před nanášením pájky a samotnou natavenou pájku drží déle v tekutém stavu. Takový proces je nejen rychlejší, ale i lepším pokrytím pájených míst pájkou dochází i ke zvýšení kvality spoje. Při porovnání laserů pevnolátkových, plynových, diodových vyniká i vysoká životnost laserových diod, která se pohybuje od 10 000 hodin až po 20 000 hodin oproti životnosti výbojek používaných k čerpání pevnolátkových laseru, která se pohybuje okolo 500 až 1000 hodin.

Vedle některých technologických předností vykazují výkonové diodové lasery při pájení i nižší provozní a pořizovací náklady než pájení s ostatními typy laserů a to dle průzkumů až o 50% přičemž rychlost pájení těchto laserů je srovnatelná.

3.3.2 YAG - pulsní lasery

(Neodym Glass /Yttrium Aluminium Granát)

Nd:YAG laser je v dnešní době nejpoužívanější typ pevnolátkového laseru.

Typická vlnová délka záření emitovaného z Nd:YAG laseru je 1064,1 nm. S menší účinností však může emitovat i záření o vlnových délkách 940, 1120, 1320 a 1440 nm. Buzen je nejčastěji xenonovou výbojkou. V závislosti na době buzení může generovat záření jak v impulsním, tak i v kontinuálním režimu. Maximální výkon v kontinuálním režimu dosahuje několika desítek wattů. V impulsním režimu se délka impulsu může pohybovat v rozmezí od mikrosekund až po jednotky pikosekund.

Nd:YAG laser má díky vysokému výkonu a vhodné vlnové délce řadu uplatnění. Hojně je užíván v technologii, např. pro vrtání, svařování, žihání, řezání a značkování. Dále své uplatnění našel i v medicíně, vědě, biologii a ve vojenských aplikacích.

3.3.3 Plynové lasery

HeNe (helium neon) laser vyzařuje na vlnových délkách 543 nm (zelená), 594 nm (žlutá) a 633 nm (červená). HeNe laser se vyznačuje svojí relativně malou velikostí a kompaktností, výbornou kvalitou svazku a dlouhou životností.

Ion (argon, krypton) lasery mají výhody ve vysokém výkonu v širokém spektru vlnových délek v UV a viditelné oblasti. Mohou být dodány v několika konfiguracích z hlediska vlnové délky - jako jednofrekvenční, multifrekvenční nebo laditelné.

CO₂ (oxid uhličitý) lasery generuje vlnovou délku asi 10 μm. Vlnová délka 10 μm je ochotně pohlcována plasty, méně ochotně kovy. V důsledku toho mohou být plastové části na desce zničeny paprskem laseru CO₂, pokud nejsou učiněna zvláštní opatření. Na druhé straně, jestliže se požaduje roztavení pájky, požadovaný účinek laseru CO₂ je podstatně větší, než laseru YAG, protože pájka absorbuje záření tavidlem a organickými složkami pájecí pasty. Laser CO₂ má podstatně vyšší účinnost (až 15%) než Neodym Glass (1%). Plynový laser není vhodný používat na pájení bez tavidla a je třeba dávat pozor na silnou odrazivost.

CO₂ lasery jsou známé, že jsou schopny dosahovat velmi vysokých výkonů s relativně dobrou efektivitou a proto se používají především v průmyslových aplikacích. Standardní

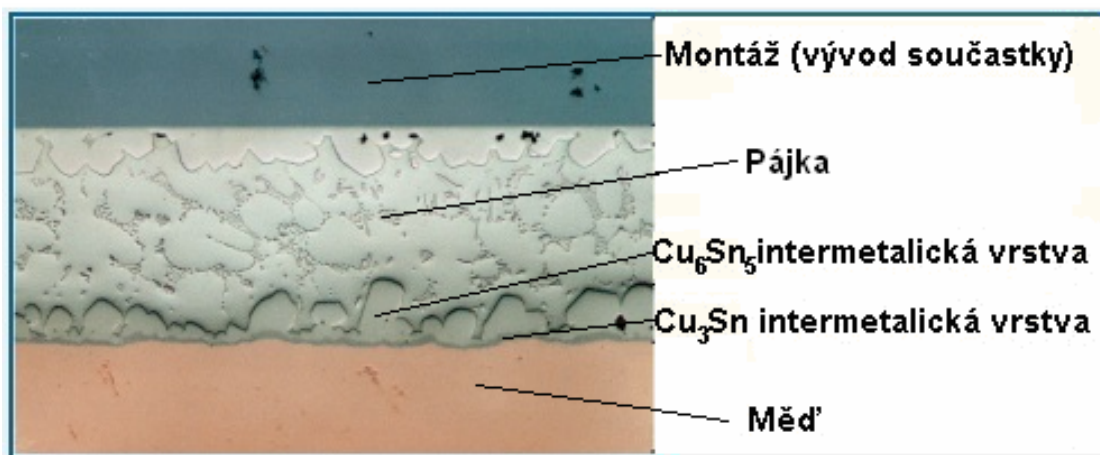
výstup je 10,6 mikronů a výkony, kterých CO₂ lasery dosahují, jsou od 1 W až po systémy přesahující 10 kW.

N₂ (dusík) lasery jsou pulsní systémy s pulsy o délce v řádech ns vyzařující na vlnové délce 337,1 nm. N₂ lasery jsou transversálně excitované atmosférické (TEA) lasery s dlouhou životností a vynikající stabilitou. Díky těmto vlastnostem jsou vhodné jako excitační zdroje pro kvalitativní a dlouhodobá měření.

4 Intermetalické vrstvy

"Intermetalické vrstvy na rozhraní mezi materiálem substrátu a pájecí slitinou **obrázek č.9** výrazně ovlivňují spolehlivost pájeného spoje. Na straně jedné zajišťují vyšší pevnostní charakteristiky formovaného spoje, na straně druhé jsou intermetalické vrstvy podstatně křehčí než pájka i základní materiál a tím redukují životnost pájeného spoje. Pokud budeme uvažovat použití Sn/Pb pájku a Cu základní materiál, dojde k vytvoření intermetalických sloučenin Cu₆Sn₅ (teplota tavení 415 °C) a Cu₃Sn (teplota tavení 670 °C). Olovo se reakcí neúčastní. Po ztuhnutí pájky se zastaví vytváření intermetalické vrstvy mechanismem rozpouštění

a pokračuje mechanismem difúze v pevné fázi - difúze je výrazně větší při zvýšených teplotách.“ [3]



Obrázek č.9 Znárodnění intermetalické vrstvy mezi substrátem, pájkou a vývodem

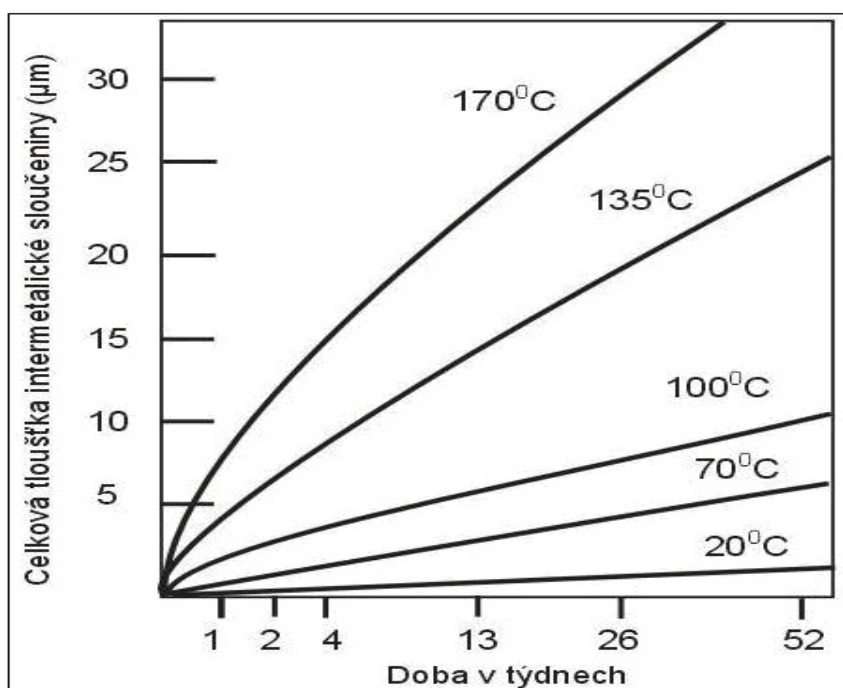
4.1 Tvorba a růst intermetalické vrstvy

Tloušťka vytvořené intermetalické vrstvy závisí na čase kdy je pájka v kapalném stavu, při procesu přetavení je to takzvaná doba nad "liquidem", vzniklá vrstva není statická, ale s časem roste. Rychlost růstu závisí na teplotě a růst pokračuje dokonce i při pokojové teplotě

závislost je patrná z grafu na **obrázku č.10**. Je-li vrstva pájky tenká, může ji intermetalická slitina celou nahradit a její vlastnosti se výrazně liší od té původní. Vývod součástky pokrytý pájkou pro dosažení lepšího smočení při pájení je pokryt intermetalickou vrstvou, která je nesmáčivá a má vyšší teplotu tání. Mohlo by se zdát, že problémy nastanou jen v případě, že upravený materiál budeme skladovat delší dobu. Výzkum intermetalických slitin ukázal, že se současně s tenkou vrstvou vytvářejí v objemu krystaly intermetalické vrstvy ihned po přetavení a mohou vystoupit až k povrchu. Místa s intermetalickou vrstvou jsou matná. Tento jev způsobuje problémy s optickou kontrolou korektně zapájených spojů.

Když se dva kovy nebo dvě slitiny dostanou do úzkého kontaktu s dalším, objevuje se difúze jednoho či více druhů každé slitiny do té druhé. V některých situacích, pokud dojde k silné interakci (vzájemnému ovlivňování) mezi těmito druhy, může se vytvořit intermetalická vrstva, což je materiál s přesně stanovenou stechiometrií. Pokud je pájka i substrát v pevném stavu jako při skladování, rovnovážného stavu je dosaženo až po velmi dlouhém čase. Když je pájkou kapalina, během výroby komponentu a v průběhu pájení, tak se mnohem rychleji přibližuje k rovnováze, protože rychlost rozhodujícího kroku je roztavení rozhraní spíše než difúze pevných látek. Od ochranné, pájení schopné krycí vrstvy, například Sn/Pb se používá při elektrolytickém pokovování s nebo bez tavení, nebo pokovení ponorem do roztavené slitiny. Je třeba uvážit růst intermetalické vrstvy v kontaktu s tekutou a pevnou pájkou.

Intermetalické vrstvy mohou mít škodlivé účinky nejenom na schopnost pájení, ale také na mechanické vlastnosti pájených spojů, protože tyto vrstvy jsou svou křehkostí (lámavostí) srovnatelné s pájkou. Ve většině případů u pevného substrátu s lehce tavitelnou krycí vrstvou (obvykle olovo nebo cín) v úzkém kontaktu, kovový substrát - S nebo jeden či více druhů kovových slitin je schopný termodynamicky vytvořit intermetalické vrstvy s jedním druhem (obvykle cín) krycí vrstvy - C. Tloušťka intermetalické vrstvy po určitém čase závisí na rozpustnosti S v C a C v S a na rychlosti difúze S a C do substrátu, krycí vrstvy a intermetalické slitiny. V praxi je rychlost difúze krycí vrstvy C mnohem vyšší v intermetalické vrstvě než v substrátu (rozpustnost cínu v ostatních běžně užívaných substrátech je velice nízká). To znamená, že intermetalická vrstva roste do substrátu. Na obrázku č.7. vidíme časovou závislost nárůstu tloušťky intermetalické vrstvy s teplotou. Při nižší teplotě není nárůst tloušťky tak patrný. Naopak vzroste-li výrazně teplota spoje, dojde k extrémnímu nárůstu této vrstvy. To znamená, že pro dlouhodobou spolehlivost spoje je dobré snažit se udržet nižší skladovací i provozní teplotu a tím i menší nárůst těchto vrstev.



Obrázek č.10 Graf závislosti nárůstu intermetalické vrstvy na čase a teplotě

4.2 Intermetalické sloučeniny na rozhraní Sn – Cu

Na rozhraní pájky a mědi se po smočení povrchu velmi rychle vytvoří vrstva tenká vrstva intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5 o tloušťce několika desetin mikrometru. Vznik této sloučeniny je podmínkou dobrého smočení a vytvoření pevné vazby pájky ke kovu. K tvorbě sloučeniny dochází i po snížení teploty a ztuhnutí pájky, tedy za nižších teplot než je teplota pájení. Toto se děje díky difúzi atomů mědi do pájky a atomů cínu do mědi. Intermetalická sloučenina má světle šedou barvu a teplotu tání přibližně 415 °C. Růstem jejího objemu je pájka v jejím bezprostředním okolí ochuzována o cín [4].

Za určitých podmínek dochází na rozhraní mědi a intermetalickou sloučeninou Cu_6Sn_5 k vytvoření druhé intermetalické sloučeniny Cu_3Sn . Ta obsahuje větší množství mědi než předchozí. Tato sloučenina je pro pájky nesmáčivá. Smáčení pájkou po vzniku této vrstvy je možné jen tehdy, když je nově vznikající intermetalická sloučenina pokryta vrstvou Cu_6Sn_5 . Vrstva Cu_3Sn se tvoří v případě, že je bráněno difúzi cínu do mědi a je podporována difúze mědi do pájky. Sloučenina Cu_3Sn má tmavě šedou barvu, její teplota tání je vyšší než 670 °C. Obnovení pájitelnosti měděného povrchu pokrytého vrstvou této sloučeniny je prakticky možné jen po jejím mechanickém odstranění nebo po jejím odleptání [4]. Struktura na rozhraní pájky a pájecí plošky je zobrazena na Obr. 9. Vlastnosti popsanych intermetalických sloučenin jsou uvedeny v **tabulce č. 5**.

Tabulka č.5 Vlastnosti intermetalických vrstev v porovnání s mědí [1]

	Cu_6Sn_5	Cu_3Sn	Cu
Tvrdost podle Vickerse	378	343	50
Mechanický charakter	Křehký	Křehký	Houževnatý
Poissonovo číslo	0,309	0,299	0,340
Tepelná roztažnost	16,3	19,0	16,0
Tepelná vodivost	34,1	70,4	385
Rezistivita	17,5	8,93	1,7
Hustota	8,3	8,9	8,9

Tloušťka vytvořených intermetalických vrstev závisí na čase a teplotě při určité aktivační energii, která v systému Sn – Cu nabývá hodnoty 0,43 eV.

Při zvýšené teplotě a opakovaném zahřívání (např. při opravách) rychle prorůstá sloučenina Cu_3Sn vrstvou Cu_6Sn_5 a může dojít k jevu zvanému odsmačeni. Pájka se z povrchu prorostlé vrstvy Cu_3Sn stahuje, shlukuje se typicky do malých nepravidelných a neuspořádaně rozmístěných kapiček. Vrstva Cu_6Sn_5 je velmi náchylná k oxidaci. Zoxidovaná vrstva je pájkou nesmačivá. K oxidaci dochází při zvýšené teplotě kyslíkem především z vodní páry, která může být obsažena v pórech nekvalitních galvanických povlaků nebo pod pokovením při výrobě desky plošného spoje, především v pokovovaných otvorech.

Kromě omezené, případně vůbec žádné smačivosti intermetalických sloučenin, mají i další nepříznivé vlastnosti. Jedním z nich je rozdílná hodnota součinitele délkové teplotní roztažnosti v porovnání s mědí a s izolačními materiály desky plošných spojů. Mechanické vlastnosti intermetalických sloučenin, jejich tvrdost a křehkost, snižují odolnost pájeného spoje zejména při střídavém mechanickém namáhání. Toto namáhání bývá často důsledkem teplotních změn vyvolaných střídavým elektrickým zatěžováním

4.3 Intermetalická oblast a vliv na pevnost spoje

Vytváření a růst intermetalické vrstvy na rozhraní mezi materiálem substrátu a pájecí slitinou ovlivňuje spolehlivost pájeného spoje. Na straně jedné je jejich přítomnost nezbytná, tím, že často vznikají v procesu chemického, tj. reaktivního smačeni povrchu, zajistí vyšší pevnostní charakteristiky formovaného spoje. Na straně druhé jsou intermetalické vrstvy

podstatně křehčí než základní kov a pokud jsou přítomny ve větší míře, redukuje životnost pájeného spoje.

Pro sledování spolehlivosti je nutné znát vliv materiálových a procesních parametrů na tloušťku a strukturu intermetalické vrstvy. Snášivost povrchů, vlastností pájky i charakteristika pájecího procesu tak předurčují správné formování i pevnost pájeného spoje. Dobré smáčecí vlastnosti rozhraní jsou u Sn/Pb eutektické a většiny bezolovnatých pájek s nadbytkem cínu, který se vyznačuje snadnou adhezí ke kovovým povrchům, přičemž se vytváří tenká intermetalická vrstva.

5 Analýzy vad

Pro zjištění kvality pájeného spoje se používá mnoho destruktivních i nedestruktivních metod, mezi které patří:

- metalografické výbrusy,
- chemická analýza,
- rastrovací elektronová mikroskopie,
- rentgenová difrakce.

5.1 Tvorba mikrovýbrusů

Výroba vzorku pro mikrovýbrus spočívá v zalití sledované struktury do dentacrylu, což je metylmetakrylátová licí pryskyřice, která se skládá z práškové a tekuté formy. Po smíchání těchto dvou složek na požadovanou konzistenci a zalití formy se sledovaným vzorkem, dochází k vytvrzení přibližně po 4 až 5 hodinách při pokojové teplotě. Samotný mikrovýbrus se provádí mechanickým broušením za mokra na kotoučových bruskách, kde je plocha vzorku opracovávána brusným papírem za stálého proudu vody. Pro broušení se nejčastěji používají brusné papíry se zrnitostí 220, 600 a 1200. Tento údaj udává počet ok síta na čtvereční palec, přes které bylo brusivo tříděno. Brusný papír zrnitosti 220 slouží k hrubému obroušení k požadovanému místu, zbylé dva brusné papíry slouží k odstranění rýh po prvním broušení.

Pro samotné pozorování na mikroskopu je nutné vzorek doleštit a zbavit tak jeho povrch zbývajících nerovností po broušení. Leštění se provádí pomocí sametových leštících kotoučů s diamantovou pastou.

5.2 Chemická analýza

Je elementární analýza využívaná v průmyslu, zemědělství, lékařství, v životním prostředí apod. Zjišťuje chemické složení, popř. strukturu neznámé látky chemickými a přístrojovými metodami.

Kvantitativní chemická analýza určuje koncentraci (provádí stanovení) prvků charakteristických skupin v organických sloučeninách nebo konkrétních sloučenin. Kvalitativní chemická analýza provádí důkaz (detekci) jejich přítomnosti. Makroanalýza pracuje s běžným množstvím vzorku nad 0,1 g, mikroanalýza operuje s menším množstvím.

5.3 Analýza rastrovacím elektronovým mikroskopem (REM)

Rastrovací, nebo též řádkovací elektronový mikroskop (angl. scanning electron microscope, SEM) je elektronový mikroskop, který využívá k zobrazování pohyblivého svazku elektronů.

Na každé místo vzorku je zaměřen úzký paprsek elektronů (prochází jej po řádcích – odtud řádkovací). Interakcí dopadajících elektronů s materiálem vzorku vznikají různé detekovatelné složky. Jak paprsek putuje po vzorku, mění se podle charakteru povrchu úroveň signálu v detektoru. Z těchto signálů je pak sestavován výsledný obraz. Získaný obraz je standardně monochromatický.

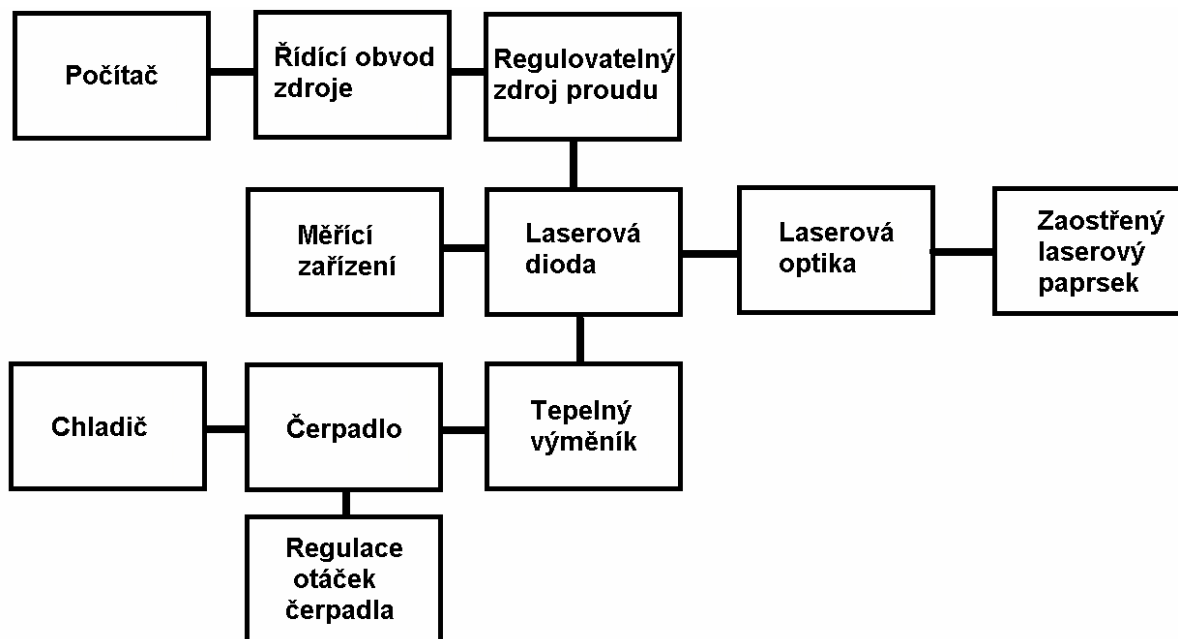
5.4 Rentgenová difrakce (XRD)

Rentgenová difrakce je technologicky vyspělá, nedestruktivní technika pro analýzu široké škály materiálů zahrnující tekutiny, kovy, minerály, polymery, katalyzátory, plasty, farmaceutika, tenké vrstvy, keramické materiály, solární články či polovodiče. XRD se stala napříč průmyslovými a výzkumnými institucemi nepostradatelnou metodou pro výzkum a charakterizaci materiálů a také kontrolu kvality. Příklady aplikací zahrnují kvalitativní a kvantitativní fázovou identifikaci, krystalografii, určování struktury a relaxace, zkoumání textury a zbytkového napětí, mikrodifrakci, nanomateriály.

Tato metoda je založená na interakci rentgenového záření s elektrony atomů spočívající v pružném (bezfotonovém) rozptylu. Díky pravidelnému periodickému uspořádání atomů v krystalické fázi dochází po rozptylu a následné interferenci rentgenového záření ke vzniku difrakčních maxim, jejichž poloha, intenzita a tvar závisí na druhu atomů a dokonalosti jejich uspořádání v 3D prostoru. Studium tohoto difrakčního obrazce pak umožňuje zpětně studovat krystalické složení vzorku a jeho mikrostrukturu. Přístroj umožňuje kvalitativní i kvantitativní studium fázového složení. Stanovení obsahu krystalické a amorfni fáze.

6 Návrh zařízení

Na základě zjištěných skutečností jsem se rozhodl sestavit zařízení schopné bezkontaktního selektivního pájení pomocí laserové diody, na **obrázku č.11** je blokové schéma navrhovaného zařízení, které se skládá z laserové diody, optiky, tepelného převodníku, čerpadla, chladiče, zdroje proudu, řídicího obvodu a dalších ovládacích a měřicích prvků.



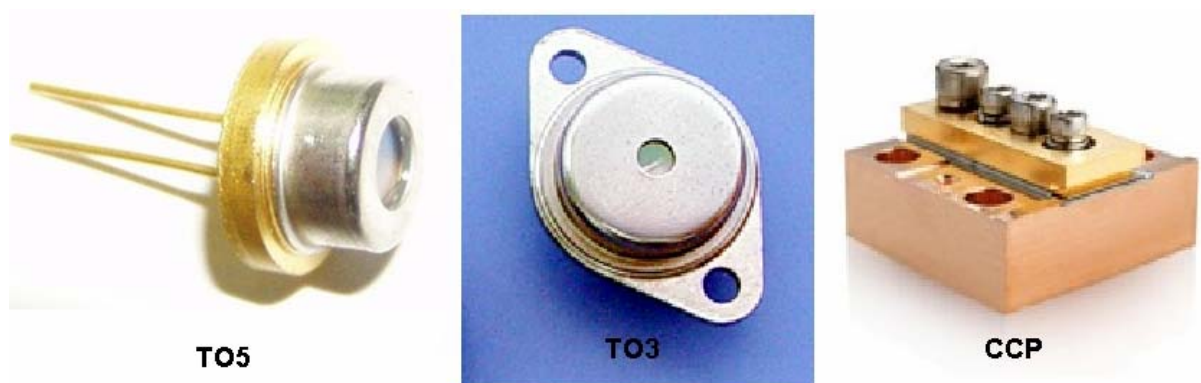
Obrázek č.11 Schéma navrhovaného zařízení

6.1 Volba laserové diody

Pro pájení pomocí laseru byl proveden test, kterým byl zjištěn účinek různých vlnových délek na pájecí pastu, nejprve byla použita laserová dioda o výkonu 1 W a vlnové délce 808 nm dále pak laserová dioda o výkonu 5 W a vlnové délce 940 nm. Z testování bylo vyzorováno, že vlnová délka 940 nm je mnohem přijatelnější pro proces pájení z důvodu větší absorpce laserového záření. Parametry jednotlivých laserových diod jsou v **tabulce č.6**.

Tabulka č.6 Parametry testovaných laserových diod

	testovací dioda A	testovací dioda B	testovací dioda C
Vlnová délka	808nm	940nm	940nm
Světelný výkon	1W	5W	50W
Typ pouzdra	TO-5(Φ9.0mm)	TO-3(Φ20.0mm)	CCP(25x25x14mm)
Napájecí napětí	2-2,3V	1,8-2V	1,6-2V
Provozní teplota	-10 ~ +40 °C	-10 ~ +40 °C	-10 ~ +40 °C
Mezní proud	1-1,2A	4,5-5A	13-50A



Obrázek č.12 Reálná podoba pouzder testovaných laserových diod

Pro sestrojení pájecího zařízení byla zvolena laserová dioda typu CCP (Conduction Cooled Package) na **obrázku č.12** od firmy Coherent se základními parametry: vlnová délka 940 nm, kontinuální výkon 50 W, napájecí napětí 1,6-2 V, maximální proud 50 A. Více parametrů je v data-sheetu v příloze. Tato dioda se nejčastěji používá pro gravírování a řezání materiálů do tloušťky okolo 1mm. Tato dioda má ztrátový výkon 40-60 W který je odváděn kovovým pouzdem na tepelný výměník kterým dle pokynů z data-sheetu od výrobce má protékat chladicí kapalina, průtok má být minimálně 6 l za minutu.

6.2 Chlazení laserové diody

Pro tento typ laserové diody jsem navrhl a sestrojil tepelný výměník viz **obrázek č.13**. Pro jeho konstrukci jsem volil měď kvůli velmi dobrému přenosu tepla. Pro jeho návrh byl použit 3D CAD systém Solidworks. Na vývody z výměníku jsem použil měděné trubičky, které jsem nalisoval do vyvrtaných děr a poté je zapájel cínovou pájkou. Laserová dioda se k tomuto výměníku připevní čtyřmi šrouby M4. Na vývody byly připojeny silikonové hadice.



Obrázek č.13 Měděný tepelný výměník s připojenými hadicemi

Oběh kapaliny zajišťovalo odstředivé čerpadlo **obrázek č.14**. Parametry tohoto čerpadla jsou uvedeny v **tabulce č.7**. Čerpadlo bylo zvoleno odstředivé, aby neohřívalo daný okruh. Jako kapalina byla použita demineralizovaná voda.

Tabulka č.7 Parametry oběhového čerpadla

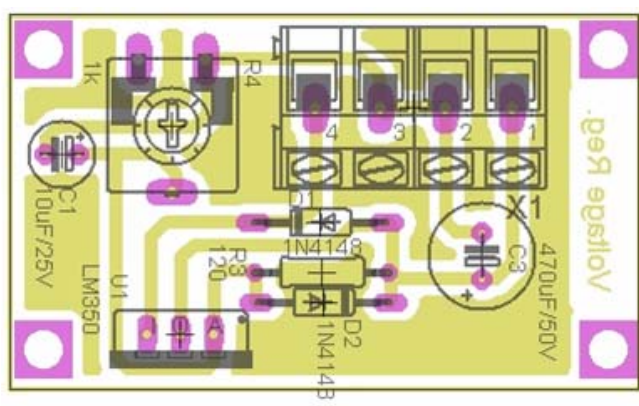
Model	Napětí [V]	Proud [mA]	Výtlačná výška [m]	Průtok [l/hod]	Pracovní teplota [°C]
DC40A-1235	12	850	3,5	620	5-60

Na regulaci průtoku chladicí kapaliny byl sestaven řídicí obvod viz **obrázek č.15**, kterým je možné pomocí potenciometru regulovat výkon čerpadla od 20-100 %, tento rozsah lze nastavit trimrem, ale je nutné zachovat stálí oběh chladicí kapaliny.



Obrázek č.14 Oběhové čerpadlo chladicího systému

Obvod byl navrhnut tak, že reguluje napájecí napětí pro čerpadlo, ale bohužel je na něm úbytek napětí 1 V, proto bylo použito napájení z počítačového zdroje 13,3 V a tím dosažení rozsahu 0-12 V, které je možno ještě doladit trimrem.



Obrázek č.15 Osazovací předloha řídicího obvodu z programu Eagle

Chlazení obvodu zajišťuje hliníkový chladič osazen ventilátory viz **obrázek č.16**, které jsou napájeny z 12V zdroje. Tento chladič je dimenzován tak, že teplota chladicí kapaliny v okruhu nepřesáhne 40 °C při teplotě okolí do 30 °C. Je možné tento chladicí okruh použít pro laserové diody do výkonů až 300 W.



Obrázek č.16 Chladič osazený ventilátory

6.3 Návrh a realizace řídicího obvodu pro ovládání proudového zdroje

Obvod pro přesné řízení laserové diody je realizován na jedné desce plošného spoje o rozměrech 87x98 mm. Na **obrázku č.17** je vidět rozvržení součástek a sít' spojů, které bylo navrženo dle schématu **příloha A1** v programu Eagle 5.0.0.

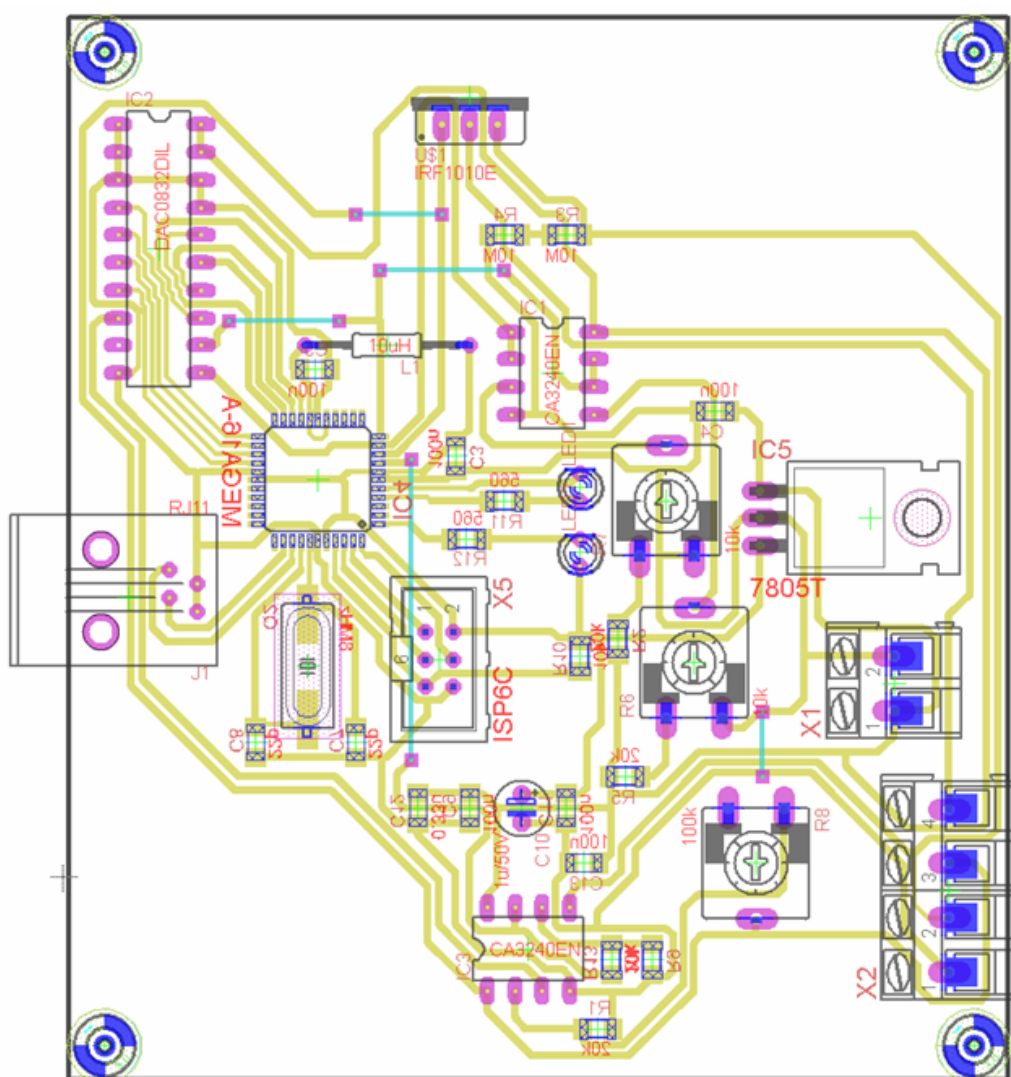
Tento obvod slouží k ovládání proudového zdroje pomocí počítače, který pomocí aplikace vytvořené v C++ Builderu dokáže jak manuální nastavení výkonu laserové diody tak načíst soubor z programu Microsoft Excel v kterém může být vyhotoven výkonový profil.

Po vyrobení desky plošného spoje následovalo oboustranné osazení součástkami. Napřed součástkami SMD a následně vývodovými součástkami pro povrchovou montáž. Tyto součástky byly zapájeny trubičkovou pájkou SN63Pb. K přetavení pájky byla použita ruční pájecí stanice.

Oživení obvodu bylo provedeno pomocí programátoru, kterým byl nahrán program na ovládání D/A převodníku. Funkčnost obvodu byla odzkoušena na skupině výkonových LED. Předběžný program měl za úkol postupně zesilovat intenzitu osvětlení a po dosažení maximální hodnoty přeskočit na začátek a začít od nuly. Tento rozsah je možné nastavit třemi

trimry. Prvním z nich se nastavuje zesílení operačního zesilovače, druhý nastavuje spodní hranici napětí a třetí nastavuje horní hranici napětí.

Tyto vlastnosti se skvěle hodí pro řízení výkonového unipolárního tranzistoru IRF1010E, který je umístěn na výstupní části řídicího obvodu. Nebo je možné na výstupní svorky připojit rovnou proudový zdroj, který umožňuje regulaci výstupních veličin pomocí napětí. Tato skutečnost by značně zjednodušila konstrukci celého zařízení, protože by odpadla část, kde by byl umístěn chladič s výkonovým tranzistorem. Jelikož ztrátový výkon na tranzistoru by mohl dosahovat desítky až stovky wattů muselo by být zařízení opatřeno dalším rozměrným chladičem a k tomu by byl nutný externí zdroj, který by tento tranzistor napájel.



Obrázek č.17 Osazovací předloha řídicího obvodu

6.4 Návrh a realizace napájení laserové diody, řídících a ovládacích obvodů

Hlavní částí mnoha zařízení jsou bezpochybně zdroje elektrické energie. V zařízení pro pájení laserovou diodou je nejdůležitější zdroj proudu pro laserovou diodu. Když se zaměříme na elektrické parametry použité laserové diody zjistíme, že pro maximální výstupní výkon je nutné použít zdroj o výstupním napětí 1-2 V a proud 0-50 A. Zdroje s těmito parametry jsou velmi specifické a špatně dostupné. V nejbližším odvětví se používají jako zdroje velkého proudu pro pokovovací a eloxovací lázně. Podařilo se nám sehnat vyřazený zdroj **obrázek č.18** s výstupními hodnotami napětí 1-3,5 V a proudu 0-70 A.

Na levé části zadního panelu zdroje jsou svorky, na které se připojí síťové napájení 120 V 5,6 A nebo 240 V 2,8 A. Svorky na pravé straně panelu jsou určeny na připojení výstupní kabeláže. Střední část panelu obsahuje svorkovnici, která slouží k ovládání a monitorování výstupních veličin, kde je možné spojením určitých svorek napevno nastavit na výstup maximální napětí nebo zapojení potenciometru jako děliče napětí, který dle referenčního napětí ovládá napětí na výstupních svorkách. Předností tohoto zdroje je připojení externího napájení na řídící svorky a tím ovládat tento zdroj pomocí jiného zařízení. Ve střední části se nachází i řada kontrolky signalizujících stav zdroje (zapnuto/vypnuto, přetížení). Rozměry zdroje jsou 94,6 x 130 x 220 mm.



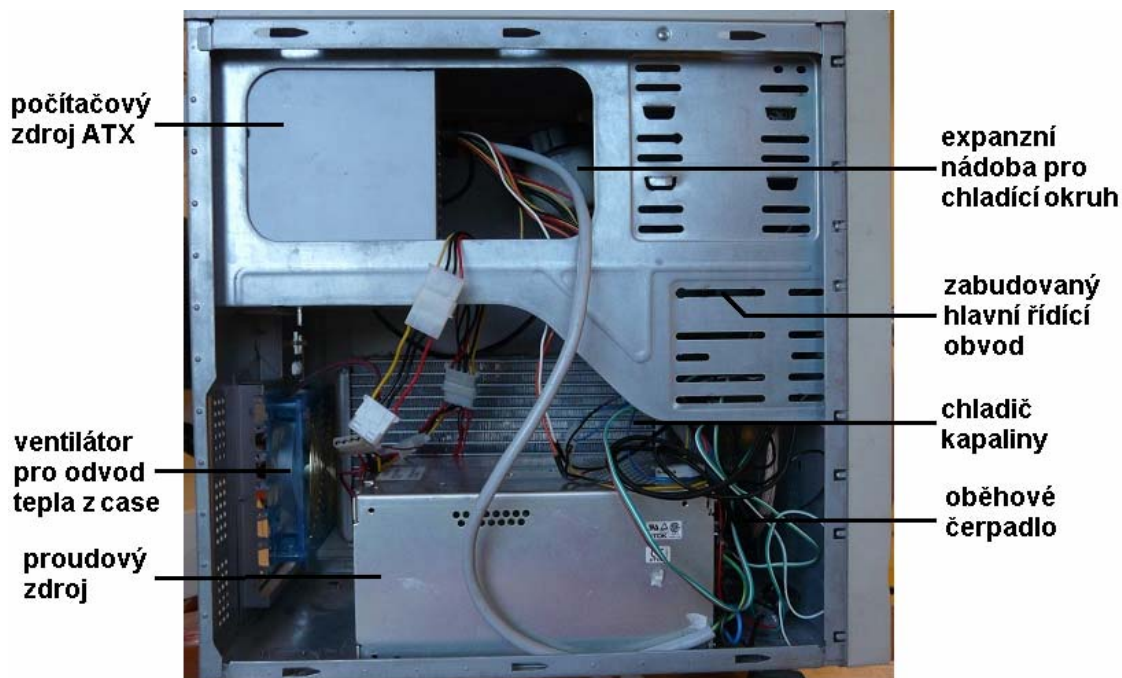
Obrázek č.18 Proudový zdroj Kepco RCW 350W od firmy TDK

Pro napájení periferních zařízení bylo využito počítačového zdroje typu ATX viz **obrázek č.19** o výkonu 350 wattů. Tento zdroj byl upraven, aby ho bylo možné použít i bez připojené základové desky počítače. Místo výstupní zdířky 230 V na zadním panelu bylo umístěno hlavní vypínací tlačítko, které umožňovalo nouzové vypnutí celé sestavy (počítačový zdroj, proudový zdroj Kepco, oběhové čerpadlo). Zdroj byl umístěn v zadní části počítačové skříně.



Obrázek č.19 Počítačový zdroj ATX 350

Do počítačové skříně byly umístěny i všechny ostatní komponenty **obrázek č.20**. Hlavní výhoda je v kompaktnosti celého zařízení a z hlediska bezpečnosti. I když je celé zařízení uzemněné obsahuje moduly a připojovací kabely, na kterých by se mohlo vyskytnout životu nebezpečné dotykové napětí.

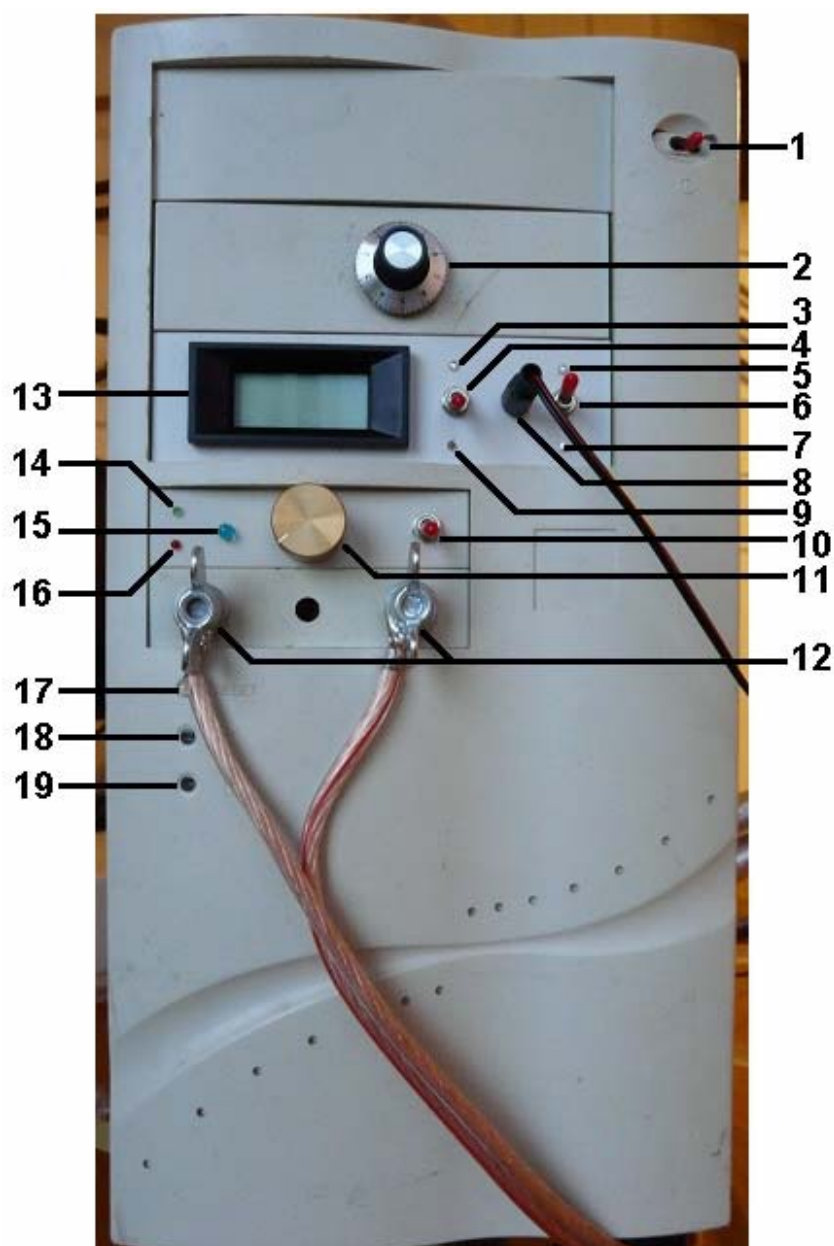


Obrázek č.20 Rozložení hlavních částí zařízení v počítačové skříně

7 Popis, parametry a ovládání zařízení pro pájení laserovou diodou

7.1 Přední panel s ovládacími prvky

Z důvodu snadné montáže byl přední panel počítačové skříně použit pro montáž ovládacích a monitorovacích prvků **obrázek č.21**. Tento panel je rozvržen na tří části, ve kterých je možné ovládat chlazení, sledovat a měřit výstupní napětí a manuálně nebo automaticky řídit výkon laseru. Popis jednotlivých prvků je v **tabulce č.8**.



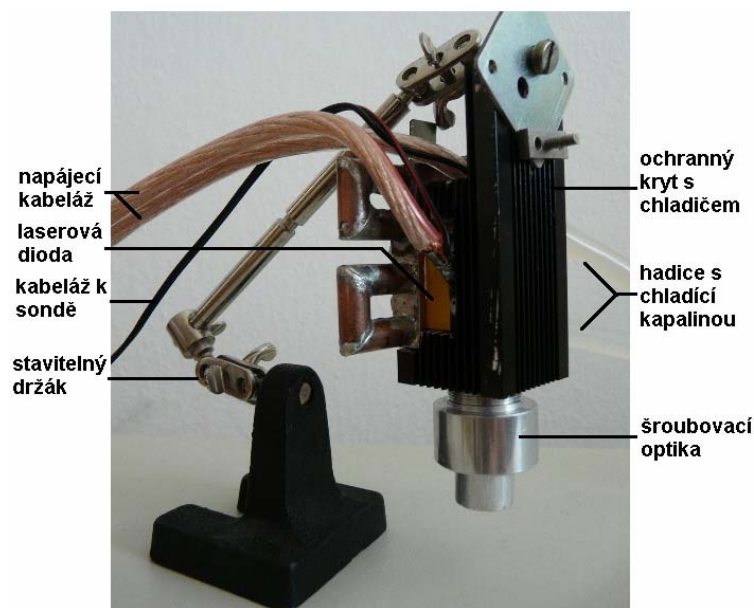
Obrázek č.21 Přední panel sestavené stanice pro laserové pájení

Tabulka č.8 Funkce ovládacích prvků pájecího zařízení

číslo prvku	funkce
1	vypínač zdroje ATX
2	regulace průtoku kapaliny v chladicím okruhu
3	signalizační kontrolka přepnutí rozsahu panelového voltmetru 0-2 V (tři desetinná místa)
4	přepínač rozsahu panelového voltmetru
5	kontrolka přepnutí voltmetru (měření na sondě)
6	přepínač měření (sonda/svorky)
7	signalizační kontrolka přepnutí voltmetru (měření na svorkách)
8	konektor pro měřicí sondu
9	signalizační kontrolka přepnutí rozsahu panelového voltmetru 0-20 V (dvě desetinná místa)
10	přepínač ovládání výstupního napětí (manuální/PC)
11	potenciometr pro manuální nastavování výstupního napětí
12	výstupní svorky s připojenými kabely
13	LCD display voltmetru
14	signalizační kontrolka přepnutí na ovládání výstupu pomocí PC
15	signalizační kontrolka přetížení proudového zdroje
16	signalizační kontrolka přepnutí na manuální ovládání výstupu
17	tlačítko pro resetování proudového zdroje
18	signalizační kontrolka napájení řídicího obvodu
19	signalizační kontrolka přenosu dat řídicím obvodem

7.2 Pájecí hlava a její části

Hlavní částí celého zařízení je pájecí hlava **obrázek č.22**, která obsahuje zdroj laserového záření (laserová dioda typu CCP 940 nm/50 W), kryt laserové diody s chladicími žebry, který je vyroben z hliníku a v přední části má vysoustružený otvor o průměru 20 mm s jemným závitem pro našroubování optické soustavy.



Obrázek č.22 Laserová pájecí hlava

Na laserovou diodu je pomocí teplovodivé pasty a čtyř šroubů připevněn tepelný výměník, do kterého je pomocí silikonových hadic přiváděna chladicí kapalina. K laserové diodě vedou napájecí kabely o průměru 6 mm a dva přívodní kabely k měřicí sondě.

7.2.1 Šroubovací optika pro laserovou hlavu

Optika se skládá ze dvou čoček o průměrech 14mm s antireflexní vrstvou určenou pro vlnové délky v rozsahu 780-960 nm **obrázek č.23**. Tyto čočky jsou umístěny v kolimační vzdálenosti cca 48mm kde ohnisko výsledného paprsku lze nastavovat vzdáleností od laserového zdroje záření. Toto nastavování je velmi obtížné, protože záření na vlnové délce 940nm je pro lidské oko neviditelné ale může jej poškodit. Pro nastavení ohniskové vzdálenosti lze použít jakékoliv zobrazovací zařízení jako je například fotoaparát nebo kamera z mobilního telefonu.



Obrázek č.23 Optická čočka pro lasery v IR spektru

7.2.2 Bezpečnost práce s laserovým zařízením

Základním parametrem pro rozdělení laserů do bezpečnostních tříd je limit přístupné energie AEL (Accessible Emission Limit), který vyjadřuje maximální úroveň emise povolené v dané třídě. Pro rozdělení laserů do tříd z hlediska bezpečnosti obsluhy je rozhodující maximální přípustná dávka ozáření MPE (Maximum Permissible Exposure), která udává úroveň laserového záření, jemuž mohou být za normálních okolností vystaveny osoby, aniž by se u nich projevil nepříznivý vliv ozáření. Hladiny MPE jsou maximální úrovně záření, při kterých mohou být oči nebo kůže ozářeny bez okamžitého nebo po dlouhém čase následujícího výsledného poškození. Hladiny MPE jsou závislé na vlnové délce, délce trvání impulsu nebo době ozáření, druhu ozářené tkáně a pro vlnové délky 400 nm až 1400 nm i na velikosti obrazu na sítnici.

Zdroj laserového záření použitý v této pájecí hlavě spadá do laserové třídy č.4 na tuto skutečnost upozorňuje štítek **obrázek č.24**, který je nalepený na boční straně pájecího zařízení. Z důvodu nebezpečného záření je nutné při manipulaci použít ochranné brýle k tomu určené. Třídy laseru jsou uvedeny v tabulce viz **příloha A6**.



Obrázek č.24 Varovný štítek pro čtvrtou laserovou třídu

Jako bezpečnostní pomůcka zde byly zvoleny brýle které jsou opatřeny filtrem, který potlačí určitou část viditelného i neviditelného spektra, v tomto případě jsou to bezpečnostní brýle od firmy Univet **obrázek č.25**, které potlačují záření o vlnové délce v rozsahu 790 - 1070 nm. Tyto brýle jsou určeny pro pohlcení odražené části laserového svazku od předmětu, na který je zaměřena laserová hlava.



Obrázek č.25 Ochranné brýle Univet které potlačují IR část spektra

8 Experiment

8.1 Sestavení pracoviště pro pájení laserovou diodou

Pracoviště pro laserové pájení se skládá z počítače, ochranných pomůcek, profiloměru s termočlánkem, přípravku pro šablonový tisk, laserové pájecí soustavy **obrázek č.26**.

Programové vybavení počítače pro správnou funkčnost všech periférií musí obsahovat operační systém Windows XP, Microsoft excel nebo jiný editor souborů *.xls a program pro měření profilů s profiloměrem KIC 2000.

Z hardwarové stránky je nutné vybavení dva volné USB porty a jeden RS232 pro připojení profiloměru.



Obrázek č.26 Pracoviště pro pájení laserovou diodou

Před použitím laserového pájecího zařízení bylo nutné pro pozdější kalibraci změřit voltampérovou charakteristiku použité laserové diody. K měření VA charakteristiky byl použit klešťový ampérmetr Voltcraft VC605 **obrázek č.27 a)** k měření proudu, pro měření napětí multimetr Metex m3270d **obrázek č.27 b)**.

Měřilo se napětí na svorkách, napětí na laserové diodě (sonda) a proud protékající napájecím kabelem k laserové diodě. Z naměřených hodnot byly vypočteny úbytky napětí na vodičích a ztrátový výkon vedení. Změřené a vypočtené hodnoty jsou zapsány v tabulce viz. **příloha A2**. Z hodnot v tabulce byly sestaveny grafy VA charakteristiky, závislost výkonu na protékajícím proudu a ztrátový výkon na protékajícím proudu. Výsledné křivky jsou vyneseny v grafech v **příloze A3-A5**.

Z těchto grafů je patrné že je nutná kalibrace řízeného zdroje ze změřených hodnot bylo zařízení zkalibrováno na rozsah 1,7 - 2,279 V což odpovídá 0-100% pro řízení pomocí

počítače. Při hodnotě 1,7 V byl příkon laserové hlavy kolem 15 W, což mělo za účinek pomocí kamery viditelné zaostření laserového svazku na desce plošného spoje (označení pájeného místa). Tato skutečnost umožňovala manuální posun na požadované místo pájení.



Obrázek č.27 Měřicí přístroje použité pro měření VA charakteristiky

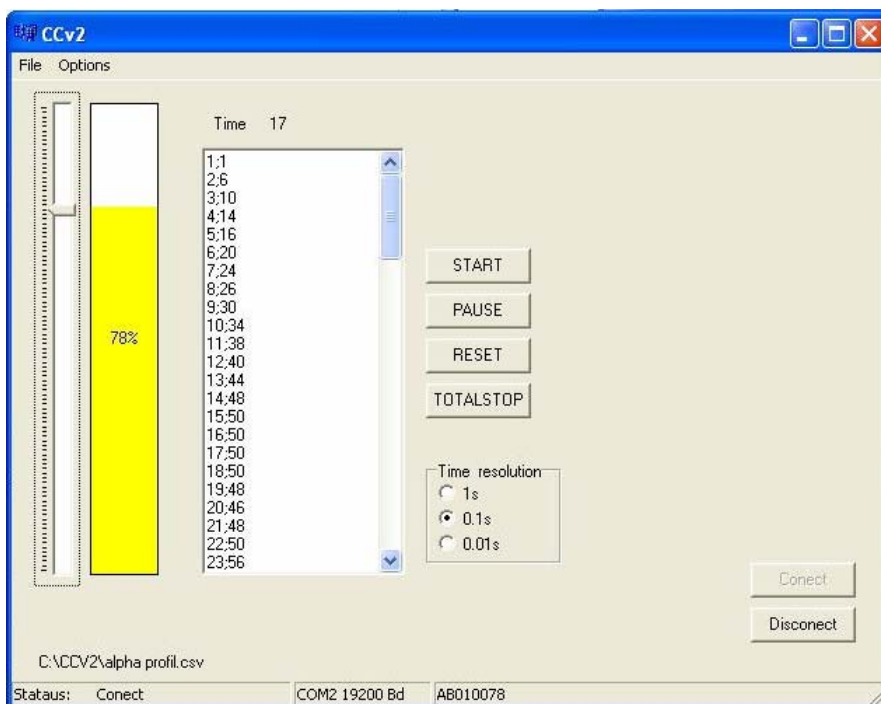
8.2 Programové nastavování výkonového profilu pro laserové pájení

Programové vybavení k pájení laserovou diodou po připojení k řídicímu obvodu umožňuje nastavení pevné hodnoty výkonu laserové diody pomocí kurzoru v levé části okna **obrázek č.28**, kde se zobrazí na kolik procent je nastaven výkon laserové diody.

Ve střední části programového okna je příkazový řádek, do kterého je možné ručně vepsat program, který se zapisuje ve tvaru čas;procentuelní výkon na příklad (1;6) znamená, že v čase 1 sekunda bude nastaven výkon na 6 %. Po napsání posloupností příkazu lze tento program spustit tlačítkem "start" a zastavit tlačítkem "pause" nebo "total stop". Tlačítko "pause" zastaví program a je možné upravit zadaná data a pokračovat tlačítkem "start" tam kde byl program zastaven. Tlačítko "total stop" zastaví program a další jeho spuštění začíná od první zadané hodnoty. Nad příkazovým řádkem je znázorněna aktuální časová jednotka je-li použito programu.

Kolodka "Time resolution" slouží k nastavení časového rozlišení, které se pohybuje od jedné sekundy do jedné setiny sekundy. Pro použití k nastavení výkonového profilu stačí

rozlišení na desetinu sekundy. V praxi to znamená, že hodnota zadaná v příkazovém řádku bude desetina sekundy, to je při 50 hodnotách 5 sekund, které tvoří tento profil.



Obrázek č.28 Okno programového ovládání řídicího obvodu

Pro snadnější nastavení výkonového profilu lze použít tabulkový procesor, kde je snadné vytvořit, případně doladit výkonový profil. První sloupec vyjadřuje časovou jednotku a ve druhém je hodnota rovna procentuelnímu výkonu laseru. Takto vytvořený soubor dat je nutné uložit s příponou *.CSV. Velkou výhodou takto zadávaných dat je možnost z nich sestavit graf a lépe nastavovat vzniklý profil.

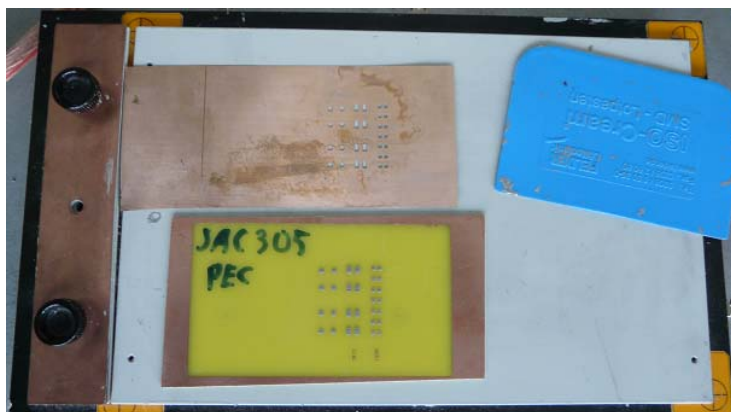
Po vytvoření tohoto souboru je možné v programovém okně pomocí příkazu: File/open tento soubor otevřít, přičemž se v levé dolní části zobrazí cesta tohoto souboru. Tlačítkem "start" se tento program ze souboru spustí, a když není nastaveno jinak, cyklicky se opakuje.

8.3 Sladění teplotního profilu s výkonovým profilem

Pro zjištění dosažené teploty byl použit nejprve bezkontaktní měřič teploty, který snímá infračervené záření. Bohužel se ukázalo, že je buď velmi nepřesný, nebo záření z laserové diody znatelně ovlivňuje měřicí přístroj. Na základě těchto poznatků byl do měření zařazen profiloměr s termočlánkem který umožňuje měření až do teploty 800 °C s počtem deseti měření za sekundu. Výhoda byla i v tom, že program sestavil teplotní profil rovnou z naměřených hodnot. Vyhodnocením nastaveného výkonového a změřeného teplotního

profilu bylo snadné doladit hodnoty pro program tak, aby výsledný teplotní profil mohl být použit jako přetavovací profil pro určité typy pájek.

Důležitou částí sestavování přetavovacího profilu je velikost plošky, na které se bude pájet a množství nanesené pájky. Z tohoto důvodu byly vytvořeny vzorkové desky, u kterých je stejná velikost pájecích plošek. K těmto deskám byla vytvořena i šablona na nanášení pájecí pasty **obrázek č.29**. Pájecí plošky mají standardní velikost (2x2 mm) pro SMT součástky typu 1208. Tloušťka šablony je 150 mikrometrů to znamená, že na každé plošce je umístěno zhruba 0,6 mm³ pasty. Profil musí být upraven v závislosti na velikosti pájecí plošky, respektive na množství nanesené pasty. Nesprávné použití přetavovacího profilu by mohlo vést k nedostatečnému přetavení pájky nebo na druhou stranu k přepálení pájecí slitiny nebo dokonce k zničení pájecí plošky a tím celé desky.



Obrázek č.29 Šablona a testovací vzorek na zařízení pro šablonový tisk

8.4 Výroba vzorků pájeného spoje pomocí zařízení pro pájení laserovou diodou

Pro výrobu vzorků byly vybrány tři druhy nejčastěji používaných bezolovnatých past s různým složením a různou teplotou tavení. Označení vybraných past je SAC305 (teplota tavení 217-219 °C), SN100C (teplota tavení 227 °C), CVP-520 (teplota tavení 160 °C). Pro tyto pasty byl vytvořen výkonový a přetavovací profil na zkušebních ploškách a následně byly tyto profily aplikovány na tvorbu porovnávacích vzorků s identickými vzorky, které byly přetaveny pomocí in-line přetavovací pece při jednotném profilu. Přetavovací profily pro laserové pájení byly nastaveny na dobu trvání 5 sekund, dosažená teplota nad liquidem (stav kdy je pájecí slitina v tekutém skupenství) byla u pájky SAC305 23,76 °C, SN100C 16,54 °C, CVP-520 58,49 °C. Výkonové a přetavovací profily pro jednotlivé pájky jsou v **příloze A7-A12**.

8.5 Výpočet integrálu dodané energie pájenému spoji pomocí zařízení pro pájení laserovou diodou.

Integrál dodané energie se v odborné literatuře o procesech pájení nazývá "*Heating Factor*" značí se Q_h . Jednotka této veličiny je Kelvin x sekunda.

Pro výpočet dodané energie se naměřené výsledky přenesou do tabulkového procesoru Microsoft excel, kde se z přenesených dat vytvoří graf, ve kterém je možné vypsát rovnice regrese pomocí spojnice trendu, ta popisuje křivky nad čarou liquidu. Vytvořené grafy jsou v **příloze A13-A15**. Z těchto grafů byly sestaveny rovnice (1.0), (1.1), (1.2) pro profily jednotlivých pájek CVP-520, SAC305, SN100C. Vypočtené Q_h je uvedeno v **tabulce č.9**. [7]

$$\int_0^{45} [0,00007x^4 - 0,005x^3 - 0,032x^2 + 4,9156x + 16204] \quad (1.0)$$

$$\int_0^{36} [-0,0003x^4 + 0,0222x^3 - 0,5138x^2 + 5,2797x + 21276] \quad (1.1)$$

$$\int_0^{26} [0,0006x^4 - 0,0043x^3 - 0,0023x^2 + 2,0713x + 22431] \quad (1.2)$$

Tabulka č.9 Hodnoty vypočtených integrálů

Teplotní profil pro pájky	Integrál energie Q_h	Rozměr
CVP-520	877,87	[K*s]
SAC305	653,48	[K*s]
SN100C	617	[K*s]

8.6 Výroba metalografického výbrusu a vyhodnocení výsledků na mikroskopu

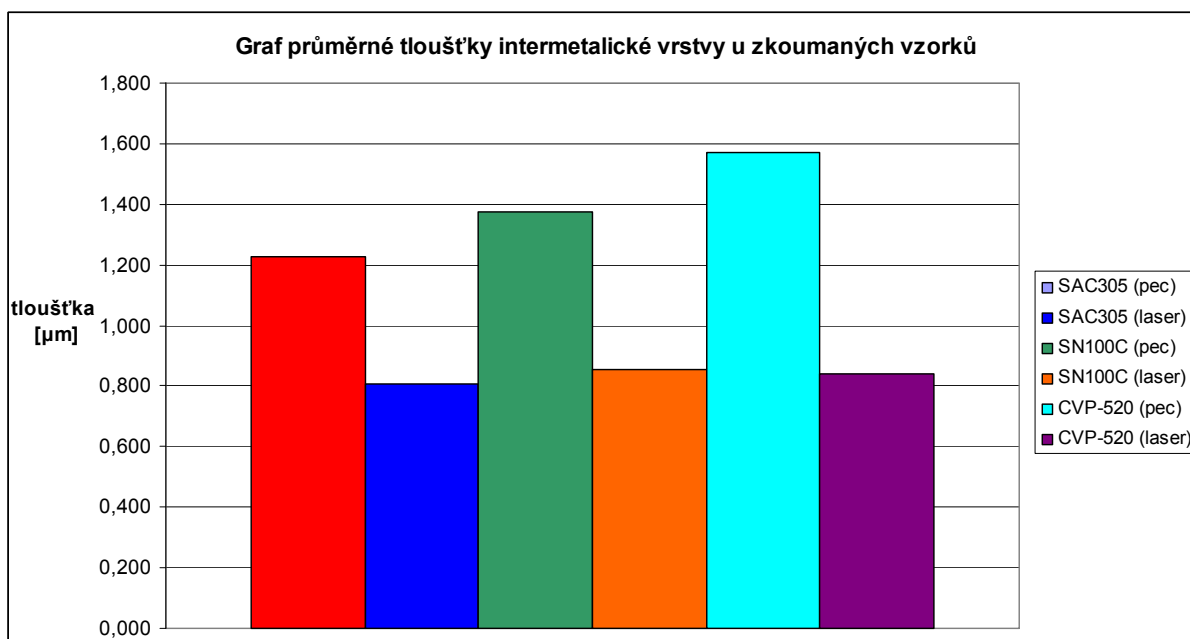
Z vytvořených vzorků byly vyřezány části DPS se dvěma zapájenými ploškami, kde po očištění následovalo zalití dentakrylovou hmotou. Vzorky byly ponechány v klidu 12 hodin při pokojové teplotě pro dokonalé vytvrzení. Po vyjmutí z formy se vzorky očistily a upnuly do brousícího zařízení, kde se použily postupně brusné kotouče o hrubosti zrn 200, 600, 1200 a na doleštění byl použit sametový kotouč s diamantovou pastou s částicemi 0,75 mikronů. V poslední fázi přípravy vzorků následoval mikrolept, který byl proveden roztokem 3% kyseliny dusičné a 97% methylalkoholu po dobu 3 sekund po kterém následovalo opláchnutí v deionizované vodě. V konečné fázi se vzorek očistil lihem a osušil proudem horkého vzduchu.

K vyhodnocení byl použit mikroskop s maximálním zvětšením 1000, na kterém bylo možné pozorovat strukturu pájeného spoje, narostlé intermetalické vrstvy a další sloučeniny vytvořené procesem pájení. Obrázky jsou vloženy v malém rozlišení v **přílohách A16-A21**, fotografie z mikroskopu v plném rozlišení jsou na DVD, které je vloženo v diplomové práci.

Tabulka č.10 Tloušťky intermetalických vrstev u zkoumaných vzorků

typ pájky	proces přetavení	tloušťka intermetalické vrstvy [μm]						průměrná hodnota [μm]
SAC305	pec	1,347	1,168	1,078	1,257	0,988	1,527	1,228
	laser	0,718	0,629	0,988	0,629	1,078	0,808	0,808
SN100C	pec	1,168	1,257	1,347	1,796	1,257	1,437	1,377
	laser	1,078	0,898	0,629	0,718	1,168	0,629	0,853
CVP-520	pec	1,527	1,796	1,976	2,066	1,347	0,718	1,572
	laser	0,898	0,539	1,168	0,718	0,629	1,078	0,838

U každého vzorku byla změřena tloušťka intermetalických vrstev na šesti místech. Tyto hodnoty jsou zapsány v **tabulce č.10**. Z hodnot v tabulce byl sestaven graf **obrázek č.30** v kterém je patrné, že energie dodaná pájenému spoji je úměrná tloušťce intermetalické vrstvy která vyrostla mezi pájkou a pájecí ploškou při procesu přetavení.



Obrázek č.30 Graf porovnání tloušťky vytvořených intermetalických vrstev

Ze skutečnosti, na které poukazuje tento graf plyne, že pájení pomocí laserové diody může pozitivně ovlivnit spolehlivost pájeného spoje, což může být využito v odvětví, kde je spolehlivost daného zařízení znatelně důležitější než cena zařízení, ve které se mírné navýšení ceny při výrobním procesu jistě promítne.

9 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo seznámit se s problematikou pájení pomocí laserové diody, navrhnout a sestavit zařízení pro pájení s možností nastavení teplotního profilu. Po sestavení zařízení vytvořit vzorky, které se porovnají se vzorky vytvořenými technologií přetavení v in-line peci. U takto vytvořených vzorků sledovat vytvořenou intermetalickou fázi. Ze zjištěných fakt porovnat kvalitu pájených spojů. Celá práce je rozdělena na dvě hlavní části, a to teoretickou a praktickou.

Teoretická část práce popisuje problematiku pájených spojů, mezi které patří typy pájecích slitin, tavidla, technologické postupy pájení, povrchové úpravy, faktory ovlivňující spolehlivost pájených spojů. V teoretické části je zahrnut přehled zdrojů laserového záření a popis vlastností jednotlivých typů. Tyto poznatky byly využity k návrhu laserového pájecího zařízení. Bylo nutné zorientovat se v oblasti laserových diod a navrhnout ekonomicky přijatelný návrh konstrukce celého zařízení.

Úkolem praktické části bylo pořídit jednotlivé komponenty z kterých následně sestavit funkční zařízení pro pájení laserovou diodou. Pro ovládání bylo nezbytné vyrobit, osadit a oživit desku plošných spojů, která umožňuje plynulé řízení napájení pro laserovou diodu. Tento obvod lze spojit s počítačem pomocí USB konektoru. Pro tento obvod byl vytvořen program, který umožňuje vkládání souborů s vytvořenými profily. Zařízení je sestaveno v počítačové skříně, která poskytuje snadnou manipulaci a ovládání celého zařízení.

Poslední část diplomové práce se zabývá tvorbou vzorků. Tyto vzorky byly vytvořeny technologií šablonového tisku s použitím třech druhů pájecích past. Pro každou pájecí pastu byl vyhotoven výkonový profil pro laserovou diodu, který odpovídal teplotnímu profilu testovaných pájecích past. Ze vzorků byly vyrobeny metalografické výbrusy u kterých se pomocí optického mikroskopu vyhodnocovala kvalita pájených spojů. Z naměřených hodnot byl sestaven graf z kterého vyplývá, že hodnota Q_h (*Heating Factor*) přímo úměrně souvisí s nárůstem intermetalické vrstvy. Z těchto výsledků lze konstatovat že přesnost nastavení teplotního profilu, kterého se dá dosáhnout pájením laserem je jeden z hlavních faktorů ovlivňujících kvalitu pájeného spoje.

Vytvořené zařízení by bylo možné umístit do XY polohovacího zařízení a použít jej například pro selektivní pájení, popisování desek plošných spojů, dělení substrátů, tvorbu tiskových šablon nebo při opravování zmetkových desek plošných spojů po výrobě.

10 Seznam použitých zdrojů

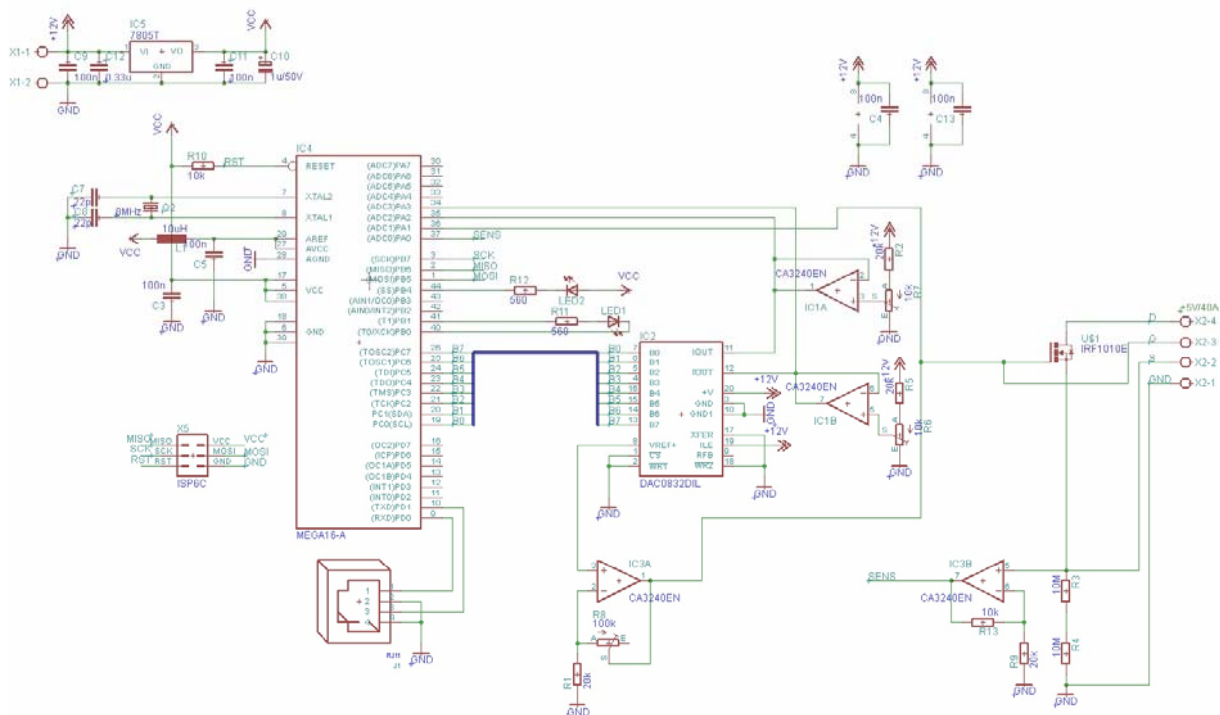
- [1] STARÝ, Jiří, Petr KAHLE a Josef ŠANDERA. Plošné spoje a povrchová montáž. *Skryptum*. s. 125. ISSN 80-214-1499-5. [cit 20.11.2011]
- [2] Srovnání olovnatých a bezolovnatých pájecích slitin. Dostupné z: WWW: <http://www.smtcentrum.cz/tema-mesice/2009-prosinec-.htm> [cit 2.5.2012]
- [3] STEJSKAL, P.; BOHRN, M. Dutiny v pájených spojkách a jejich diagnostika. In *Sborník příspěvků konference KRÁLÍKY 2009*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. s. 265-268. ISBN: 978-80-214-3938-2. [cit 7.4.2012]
- [4] STEJSKAL, P. Vliv intermetalických sloučenin na spolehlivost pájeného spoje. In *Elektrotechnika a informatika 2008*. Plzeň: 2008. s. 115-118. ISBN: 978-80-7043-702-5. [cit 3.5.2012]
- [5] Bezolovnaté pájky/cín. 2010. Dostupné z: www.britrade.cz/cz/elektronika/materialy-pro-vyrobu-dps/bezolovnate-pajky-cin [cit 3.5.2012]
- [6] SZENDIUCH, Ivan. Pájení a bezolovnaté pájky. Dostupné z: <http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf> [cit 8.2.2012]
- [7] YU-DONG, LU, HE XIAO-QI, EN YUN-FEI, WANG XIN a ZHUANG ZHI-QIANG. Polarity effect of electromigration on intermetallic compound formation in SnPb solder joints. *Acta materialia*. s. -. ISSN 1359-6454. DOI: 10.1016/j.actamat. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645409000925> [cit 2.4.2012]
- [8] ADÁMEK, Martin, Cyril VAŠKO a Miloš DRLÍK. Pájení v elektrotechnické výrobě Kontrola jakosti spojů. s. 12. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/L04b_p%C3%A1jen%C3%AD_a_kontrola.pdf [cit 18.5.2012]
- [9] Pájení laserem (ostatní způsoby). Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-19-93laser.pdf> [cit 20.5.2012]
- [10] ŠMÍD, J. Mikropájení a makropájení laserem. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/mikronapajeni-a-makropajeni-laserem> [cit 20.5.2012]
- [11] ŠULC, Jan. Lasery a jejich aplikace. 2007. Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf> [cit 10.4.2012]

- [12] KUSALA, Jaroslav. Jak funguje laser. 2004. Dostupné z: <<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k23.htm> [cit 1.5.2012]
- [13] SUGANUMA, Katsuaki. *Lead-free soldering in electronics: science, technology and environmental impact*. London: Momenta, c2004. ISSN 0-8247-4102-1. [cit 7.4.2012]
- [14] LEE, N. *Re ow Soldering Processes and Troubleshooting*. 2001. ISSN 0-7506-4749-3. Dostupné z: <http://books.google.com/books?id=TvAuIPrZmEC&pg=PA215&dq=solder+ip+chip&hl=en&ei=3BXzS42pDpWKmwPmmJCxDQ&sa=X&oi=bookresult&ct=result&resnum=3&ved=0CDkQ6AEwAg#v=onepage&q=solder%20ip%20chip&f=false> [cit 7.4.2012]
- [15] MANKO, Howard. *Solders and soldering: materials, design, production, and analysis for reliable bonding*. New York: McGraw-Hill, c2001. ISSN 0-07-134417-9. [cit 24.5.2012]
- [16] SZENDIUCH, Ivan. *Sdělovací technika: telekomunikace - elektronika - multimédia*. Praha: Petr Beneš v nakladatelství Sdělovací technika s. r. o. ISSN 0036-9942. [cit 1.3.2010]

11 Seznam příloh

Příloha A1	Schéma zapojení řídicího obvodu
Příloha A2	Tabulka změřených a vypočtených hodnot laserové diody
Příloha A3	Graf VA charakteristiky laserové diody
Příloha A4	Graf účinnosti
Příloha A5	Graf ztrátového výkonu
Příloha A6	Tabulka bezpečnostních tříd laserů
Příloha A7	Teplotní profil pro pájku CVP-520
Příloha A8	Teplotní profil pro pájku SAC305
Příloha A9	Teplotní profil pro pájku SN100C
Příloha A10	Výkonový profil pro pájku CVP-520
Příloha A11	Výkonový profil pro pájku SAC305
Příloha A12	Výkonový profil pro pájku SN100C
Příloha A13	Graf špičky přetavovacího profilu u pájky CVP-520
Příloha A14	Graf špičky přetavovacího profilu u pájky SAC305
Příloha A15	Graf špičky přetavovacího profilu u pájky SN100C
Příloha A16	Snímek intermetalické fáze u pájky CVP-520 po přetavením laserem
Příloha A17	Snímek intermetalické fáze u pájky CVP-520 po přetavením v in-line peci
Příloha A18	Snímek intermetalické fáze u pájky SAC305 po přetavením laserem
Příloha A19	Snímek intermetalické fáze u pájky SAC305 po přetavením v in-line peci
Příloha A20	Snímek intermetalické fáze u pájky SN100C po přetavením laserem
Příloha A21	Snímek intermetalické fáze u pájky SN100C po přetavením v in-line peci

Příloha A1. Schéma zapojení řídicího obvodu



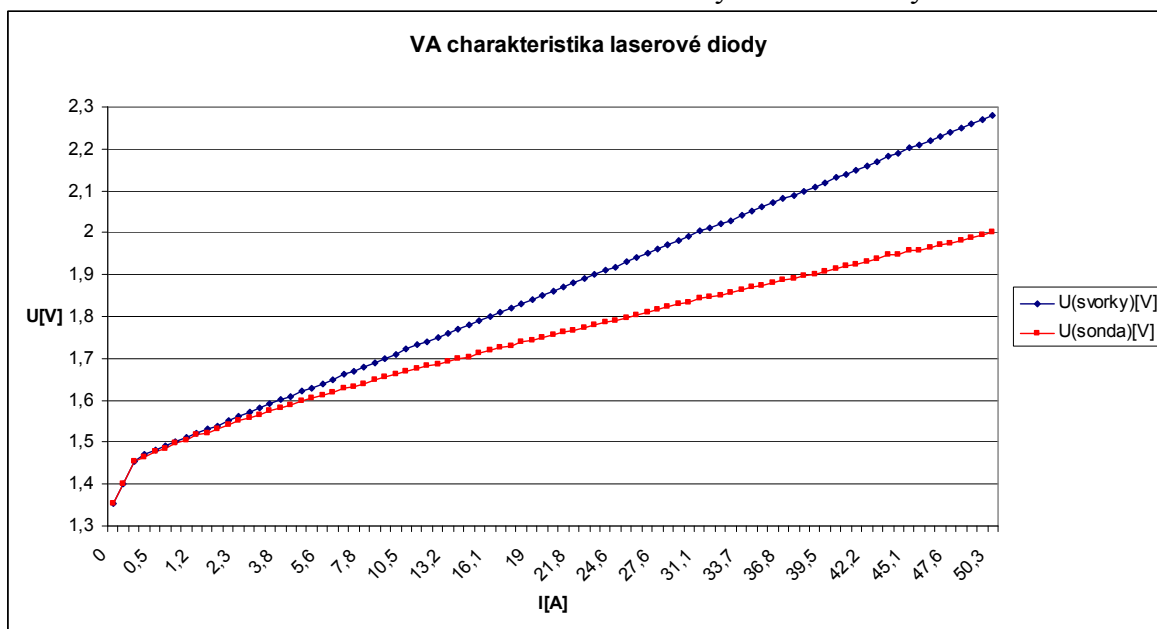
Příloha A2. Tabulka změřených a vypočtených hodnot laserové diody

U(svorky)[V]	I[A]	U(sonda)[V]	P _p [W]	P[W]	ΔU[V]	ΔP[W]
1,354	0	1,354	0	0	0	0
1,4	0	1,4	0	0	0	0
1,453	0	1,453	0	0	0	0
1,47	0,4	1,466	0,588	0,5864	0,004	0,0016
1,482	0,5	1,478	0,741	0,739	0,004	0,002
1,49	0,6	1,486	0,894	0,8916	0,004	0,0024
1,5	0,8	1,497	1,2	1,1976	0,003	0,0024
1,51	0,9	1,504	1,359	1,3536	0,006	0,0054
1,523	1,2	1,517	1,8276	1,8204	0,006	0,0072
1,53	1,4	1,523	2,142	2,1322	0,007	0,0098
1,539	1,6	1,531	2,4624	2,4496	0,008	0,0128
1,55	2	1,54	3,1	3,08	0,01	0,02
1,562	2,3	1,55	3,5926	3,565	0,012	0,0276
1,571	2,6	1,557	4,0846	4,0482	0,014	0,0364
1,581	2,9	1,566	4,5849	4,5414	0,015	0,0435
1,592	3,4	1,574	5,4128	5,3516	0,018	0,0612
1,601	3,8	1,582	6,0838	6,0116	0,019	0,0722
1,61	4,2	1,59	6,762	6,678	0,02	0,084
1,621	4,7	1,597	7,6187	7,5059	0,024	0,1128
1,63	5,2	1,605	8,476	8,346	0,025	0,13
1,64	5,6	1,611	9,184	9,0216	0,029	0,1624
1,649	6,1	1,618	10,0589	9,8698	0,031	0,1891
1,661	6,9	1,628	11,4609	11,2332	0,033	0,2277

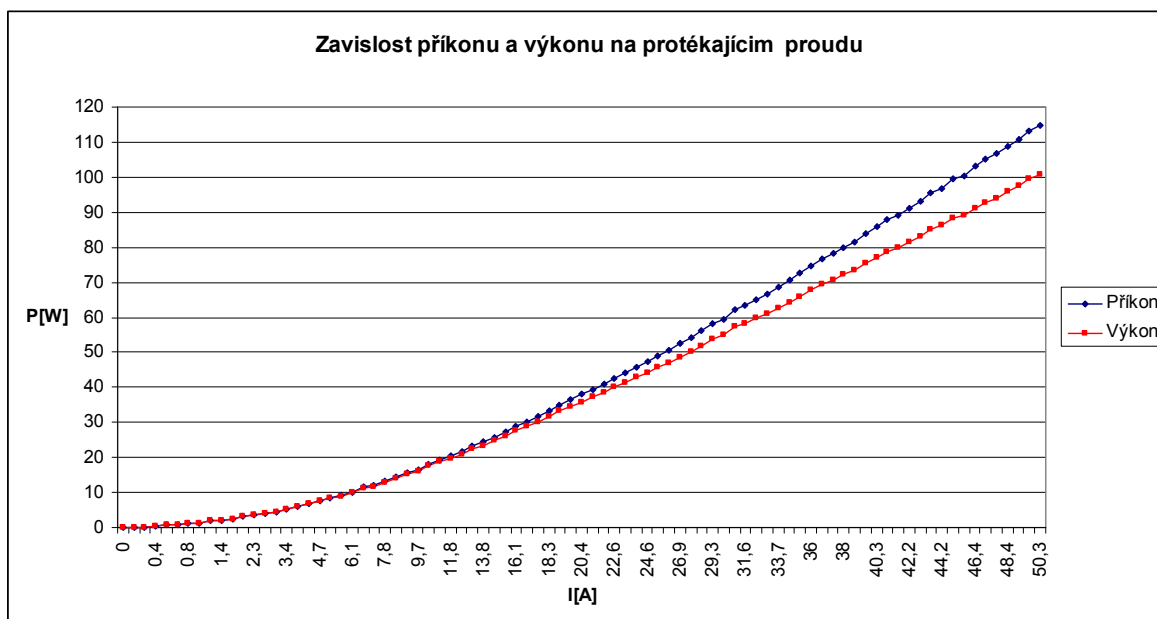
1,67	7,2	1,633	12,024	11,7576	0,037	0,2664
1,68	7,8	1,64	13,104	12,792	0,04	0,312
1,69	8,5	1,648	14,365	14,008	0,042	0,357
1,7	9,3	1,657	15,81	15,4101	0,043	0,3999
1,71	9,7	1,661	16,587	16,1117	0,049	0,4753
1,722	10,5	1,668	18,081	17,514	0,054	0,567
1,732	11,2	1,675	19,3984	18,76	0,057	0,6384
1,741	11,8	1,681	20,5438	19,8358	0,06	0,708
1,75	12,4	1,687	21,7	20,9188	0,063	0,7812
1,761	13,2	1,694	23,2452	22,3608	0,067	0,8844
1,77	13,8	1,7	24,426	23,46	0,07	0,966
1,78	14,5	1,703	25,81	24,6935	0,077	1,1165
1,791	15,3	1,713	27,4023	26,2089	0,078	1,1934
1,801	16,1	1,719	28,9961	27,6759	0,082	1,3202
1,81	16,7	1,725	30,227	28,8075	0,085	1,4195
1,82	17,4	1,73	31,668	30,102	0,09	1,566
1,831	18,3	1,738	33,5073	31,8054	0,093	1,7019
1,841	19	1,744	34,979	33,136	0,097	1,843
1,851	19,7	1,751	36,4647	34,4947	0,1	1,97
1,861	20,4	1,757	37,9644	35,8428	0,104	2,1216
1,871	21,1	1,762	39,4781	37,1782	0,109	2,2999
1,88	21,8	1,768	40,984	38,5424	0,112	2,4416
1,89	22,6	1,774	42,714	40,0924	0,116	2,6216
1,9	23,3	1,78	44,27	41,474	0,12	2,796
1,911	24	1,786	45,864	42,864	0,125	3
1,919	24,6	1,791	47,2074	44,0586	0,128	3,1488
1,93	25,4	1,798	49,022	45,6692	0,132	3,3528
1,94	26,1	1,803	50,634	47,0583	0,137	3,5757
1,95	26,9	1,81	52,455	48,689	0,14	3,766
1,96	27,6	1,817	54,096	50,1492	0,143	3,9468
1,971	28,5	1,822	56,1735	51,927	0,149	4,2465
1,982	29,3	1,829	58,0726	53,5897	0,153	4,4829
1,99	29,9	1,833	59,501	54,8067	0,157	4,6943
2,004	31,1	1,843	62,3244	57,3173	0,161	5,0071
2,012	31,6	1,846	63,5792	58,3336	0,166	5,2456
2,02	32,2	1,851	65,044	59,6022	0,169	5,4418
2,029	32,8	1,856	66,5512	60,8768	0,173	5,6744
2,041	33,7	1,863	68,7817	62,7831	0,178	5,9986
2,051	34,4	1,869	70,5544	64,2936	0,182	6,2608
2,061	35,2	1,875	72,5472	66	0,186	6,5472
2,072	36	1,88	74,592	67,68	0,192	6,912
2,083	36,8	1,887	76,6544	69,4416	0,196	7,2128
2,09	37,4	1,892	78,166	70,7608	0,198	7,4052
2,1	38	1,897	79,8	72,086	0,203	7,714
2,11	38,7	1,902	81,657	73,6074	0,208	8,0496
2,12	39,5	1,908	83,74	75,366	0,212	8,374
2,131	40,3	1,915	85,8793	77,1745	0,216	8,7048
2,14	41	1,92	87,74	78,72	0,22	9,02

2,15	41,5	1,924	89,225	79,846	0,226	9,379
2,16	42,2	1,93	91,152	81,446	0,23	9,706
2,17	43	1,936	93,31	83,248	0,234	10,062
2,181	43,8	1,946	95,5278	85,2348	0,235	10,293
2,189	44,2	1,948	96,7538	86,1016	0,241	10,6522
2,204	45,1	1,957	99,4004	88,2607	0,247	11,1397
2,21	45,4	1,959	100,334	88,9386	0,251	11,3954
2,221	46,4	1,965	103,0544	91,176	0,256	11,8784
2,231	47,1	1,972	105,0801	92,8812	0,259	12,1989
2,24	47,6	1,976	106,624	94,0576	0,264	12,5664
2,251	48,4	1,981	108,9484	95,8804	0,27	13,068
2,261	49	1,988	110,789	97,412	0,273	13,377
2,271	49,9	1,994	113,3229	99,5006	0,277	13,8223
2,279	50,3	2	114,6337	100,6	0,279	14,0337

Příloha A3. Graf VA charakteristiky laserové diody



Příloha A4. Graf účinnosti



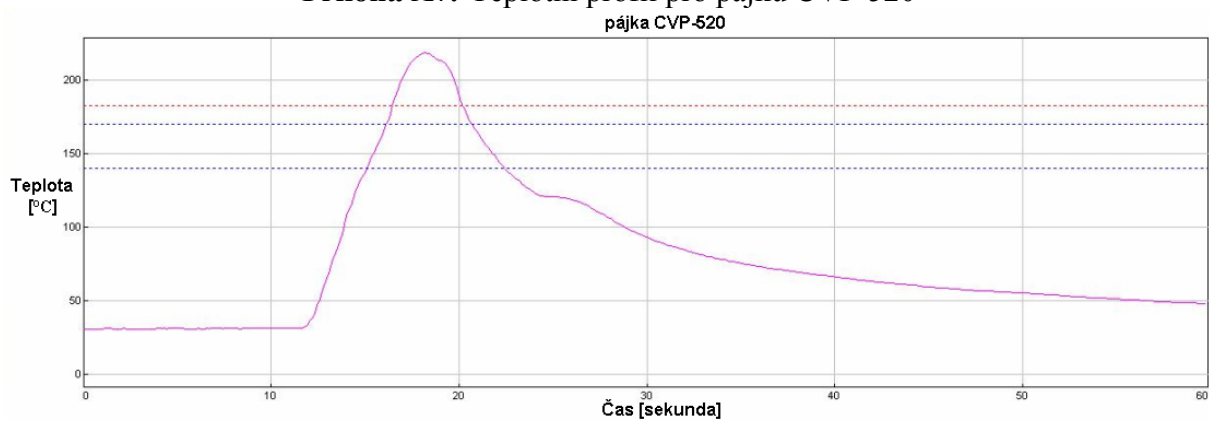
Příloha A5. Graf ztrátového výkonu



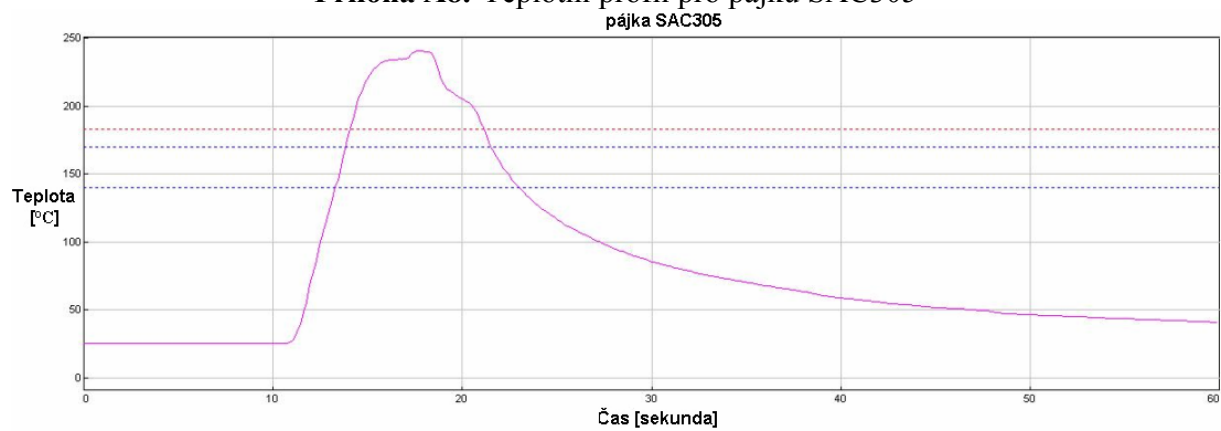
Příloha A6. Tabulka bezpečnostních tříd laserů

Třída laseru	Bezpečnostní rizika
třída I	možný trvalý pohled do svazku laserového paprsku
třída II	kontinuální a viditelné záření, přímý pohled do zdroje možný, oko ochrání mrkací reflex
třída III	a) totéž jako třída II, ale oko již může být poškozeno při pohledu do zdroje pomocí optické soustavy (např. dalekohled)
	b) nebezpečí poškození oka, nutno používat ochranné pomůcky (i při pozorování odrazu), max. emise 0,5 W
třída IV	totéž jako třída III b), emise překračuje výkon 0,5 W

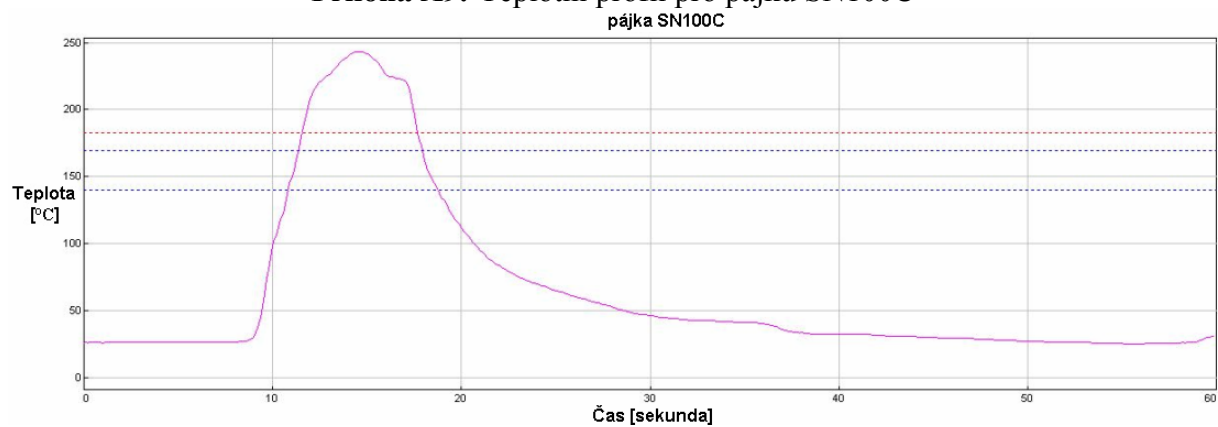
Příloha A7. Teplotní profil pro pájku CVP-520



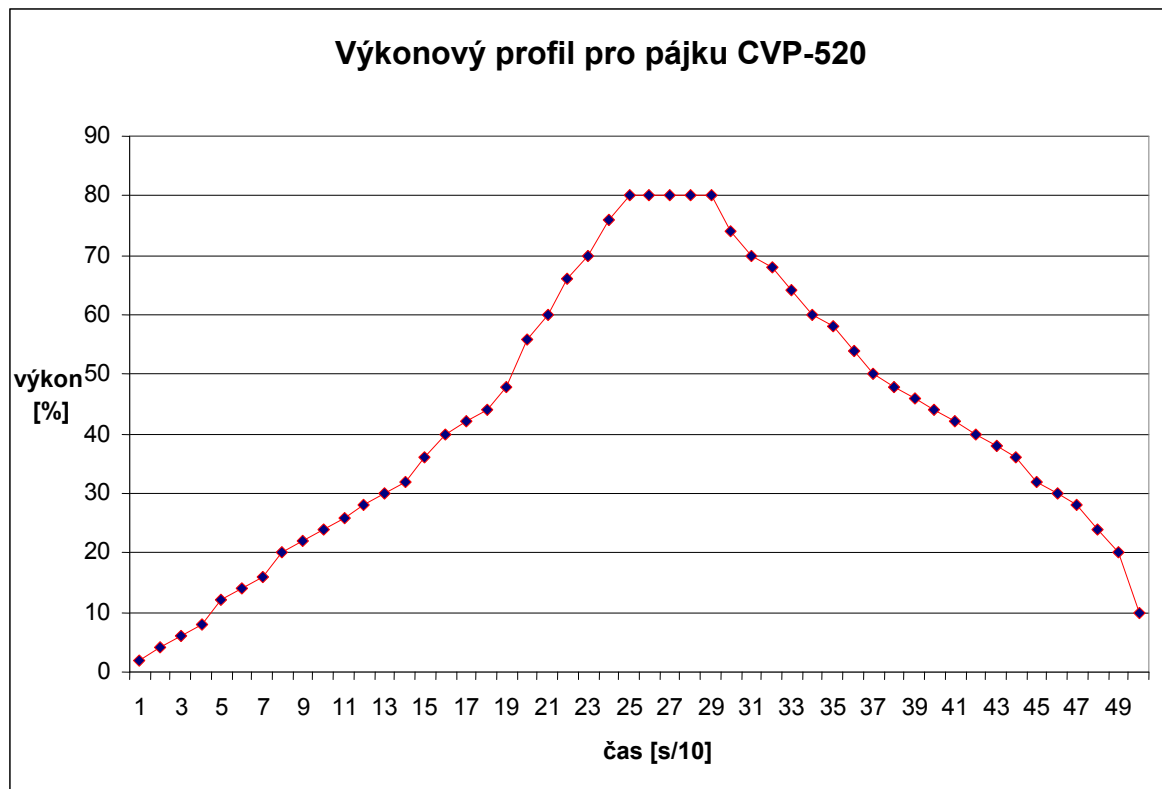
Příloha A8. Teplotní profil pro pájku SAC305



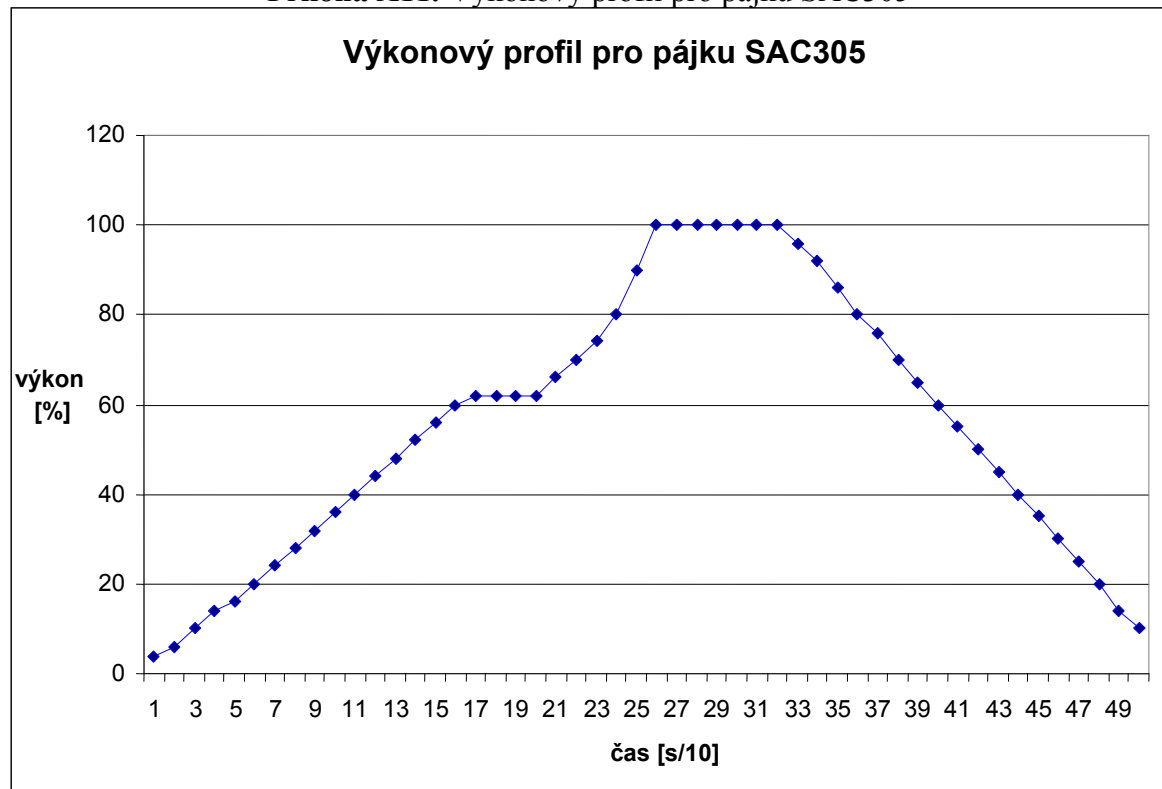
Příloha A9. Teplotní profil pro pájku SN100C



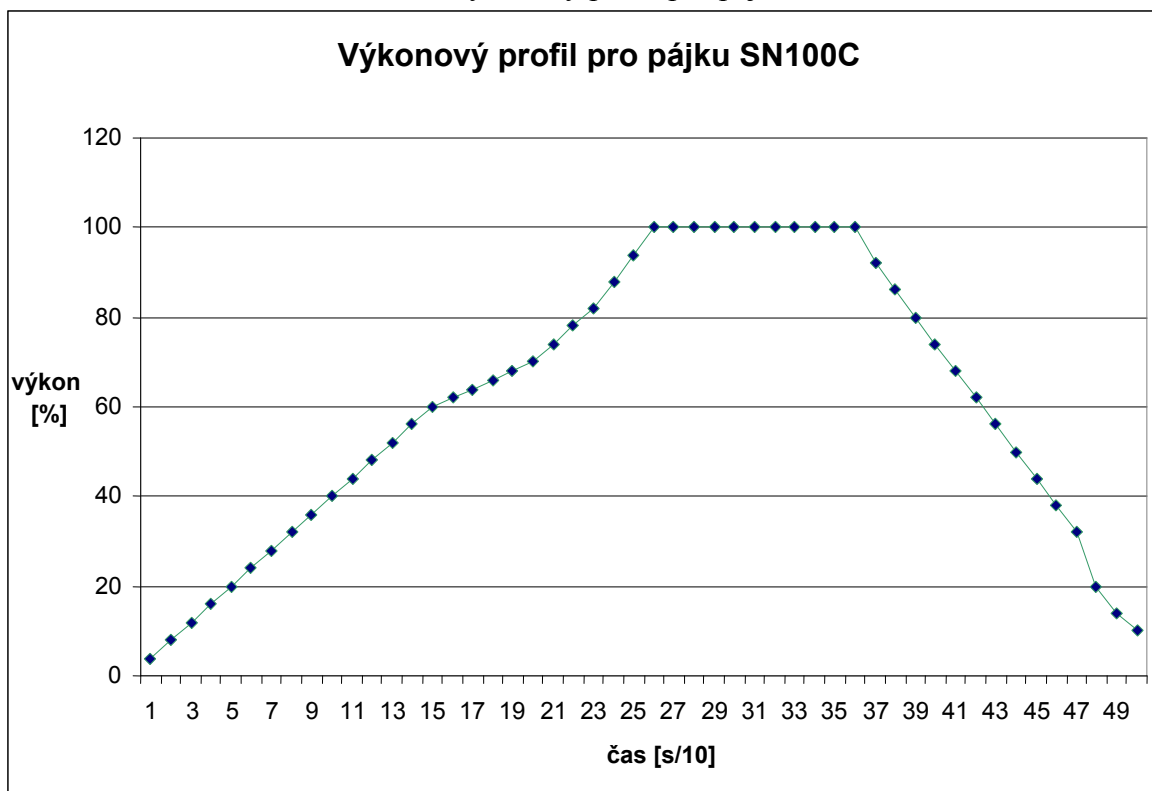
Příloha A10. Výkonový profil pro pájku CVP-520



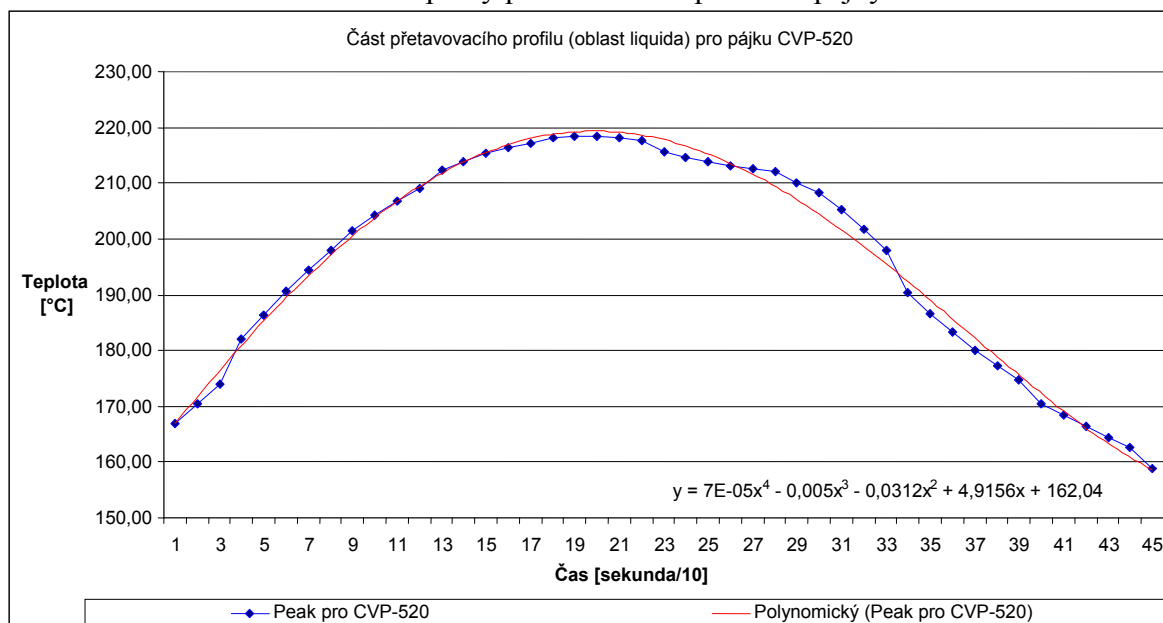
Příloha A11. Výkonový profil pro pájku SAC305



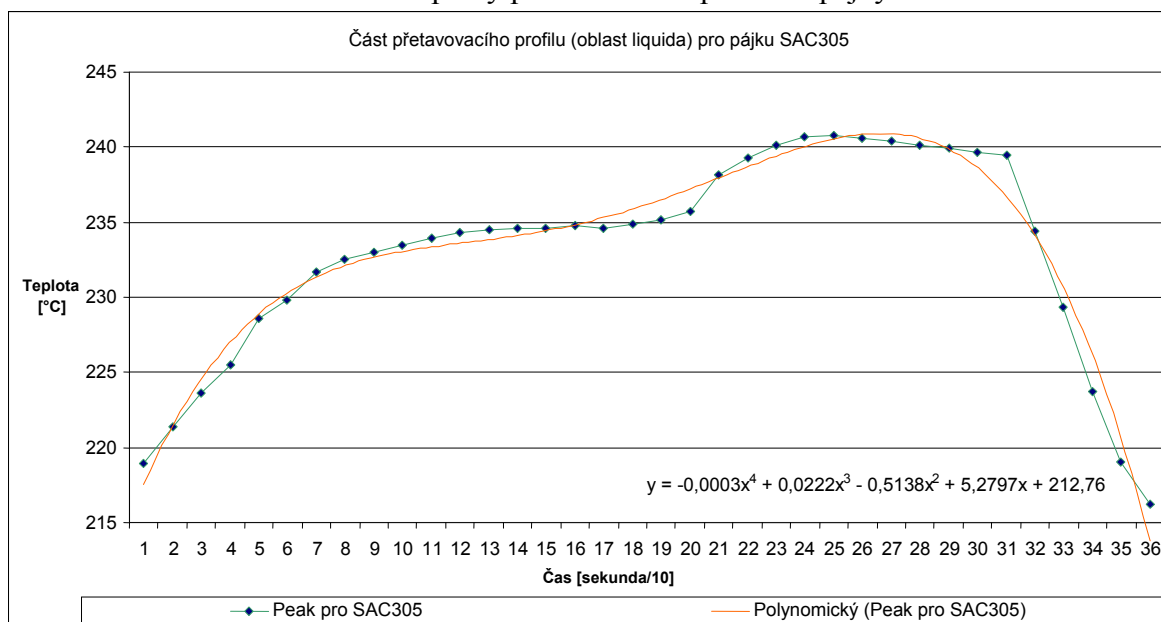
Příloha A12. Výkonový profil pro pájku SN100C



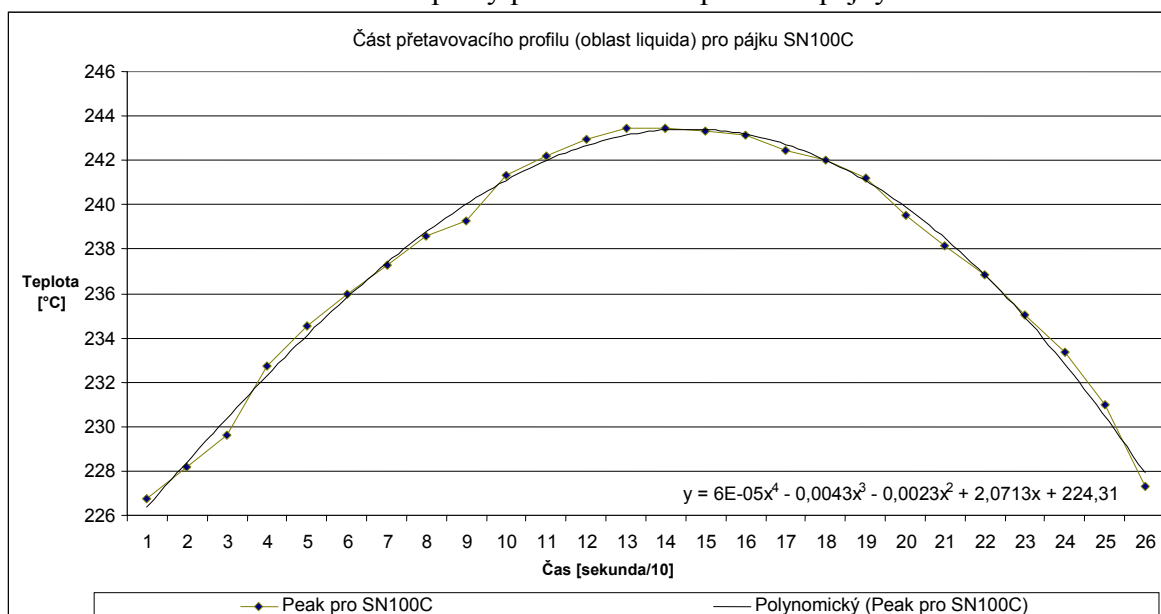
Příloha A13. Graf špičky přetavovacího profilu u pájky CVP-520



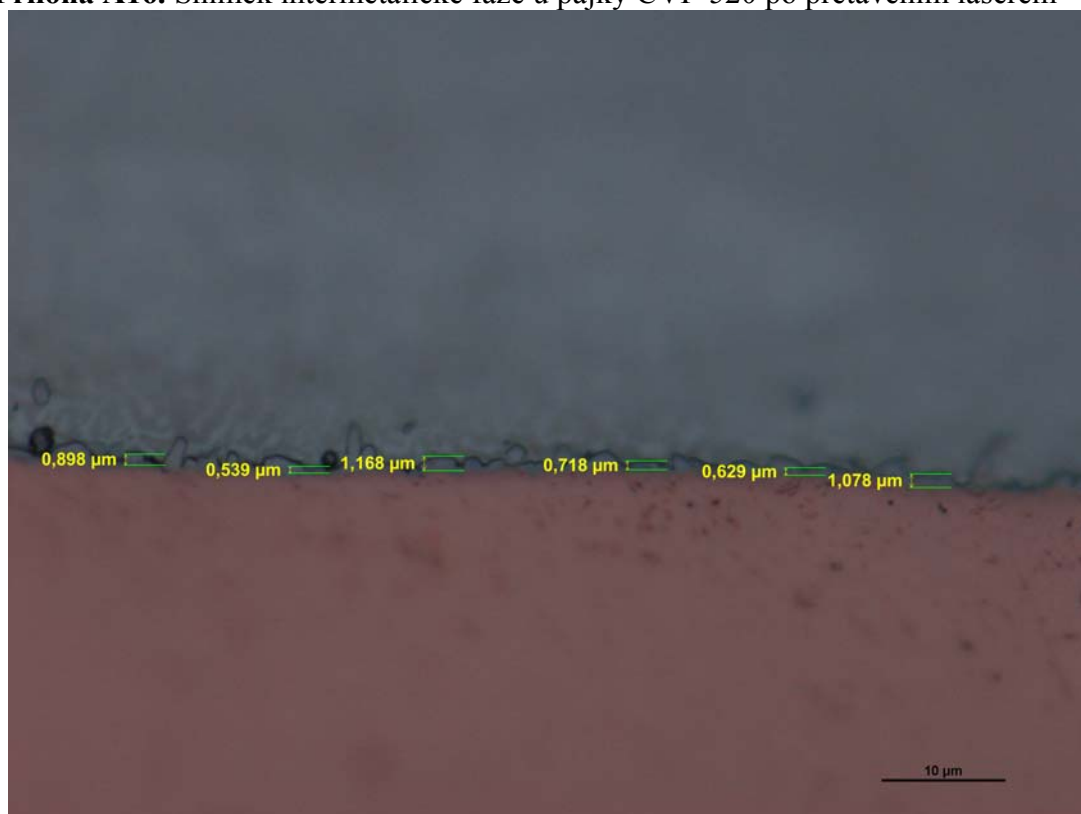
Příloha A14. Graf špičky přetavovacího profilu u pájky SAC305



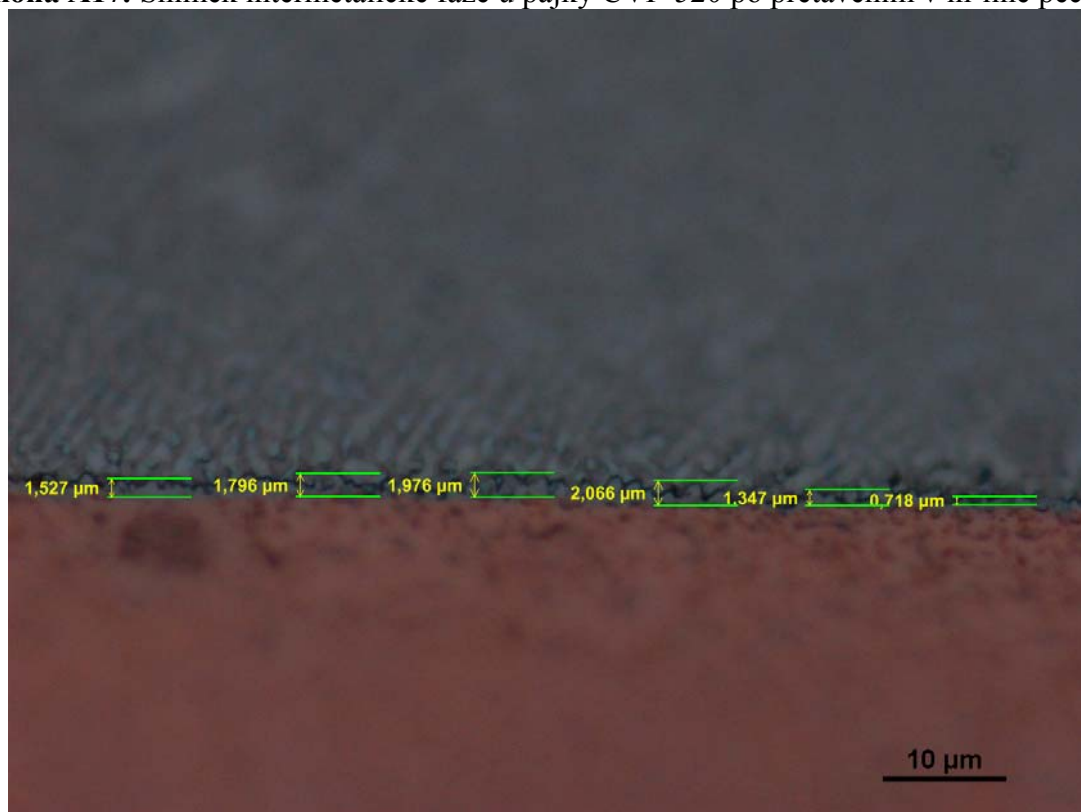
Příloha A15. Graf špičky přetavovacího profilu u pájky SN100C



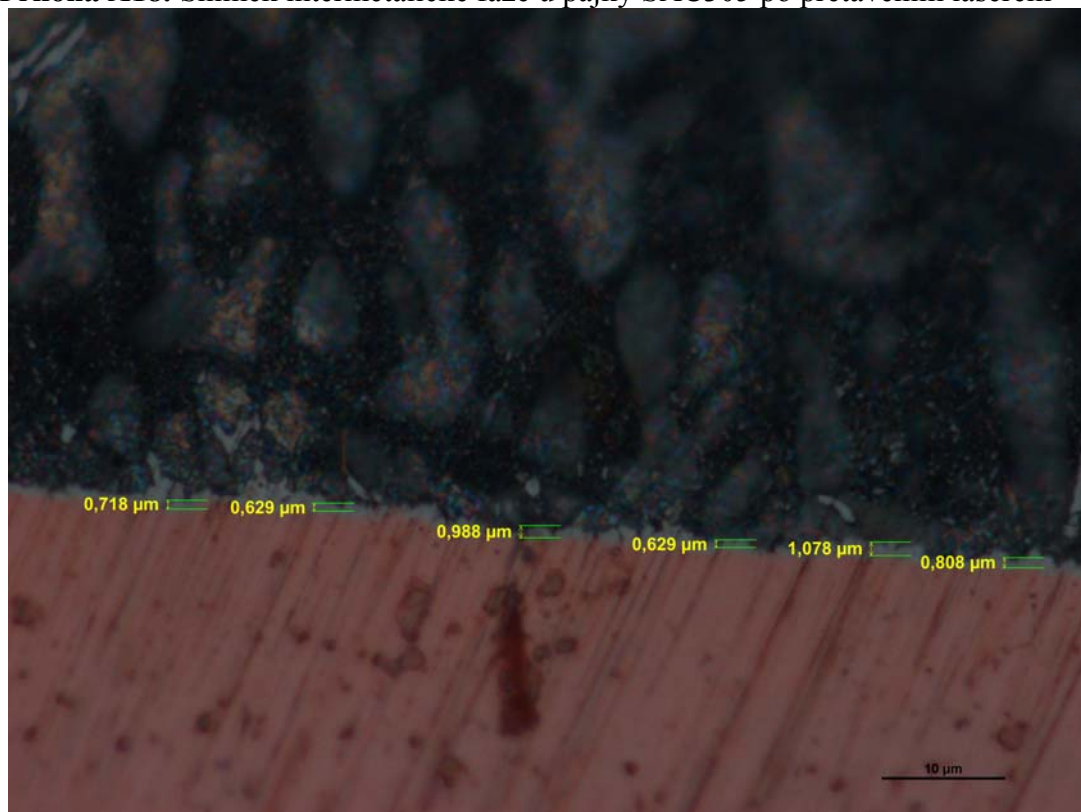
Příloha A16. Snímek intermetalické fáze u pájky CVP-520 po přetavením laserem



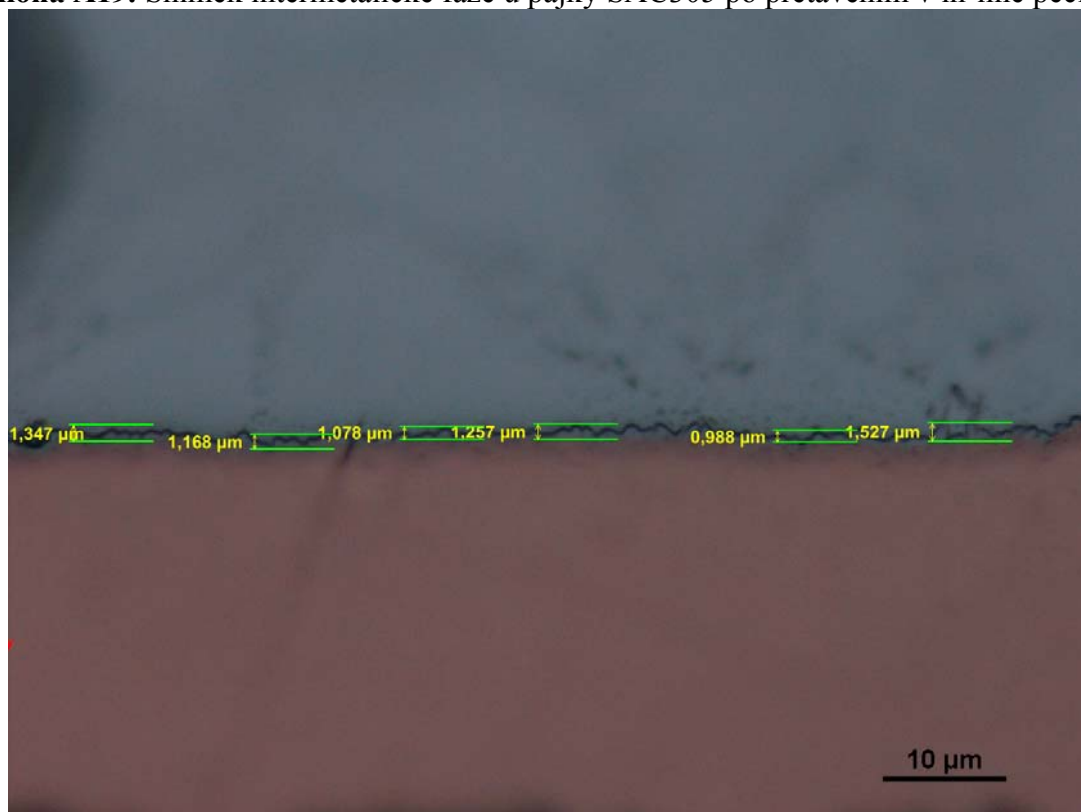
Příloha A17. Snímek intermetalické fáze u pájky CVP-520 po přetavením v in-line peci



Příloha A18. Snímek intermetalické fáze u pájky SAC305 po přetavením laserem



Příloha A19. Snímek intermetalické fáze u pájky SAC305 po přetavením v in-line peci



Příloha A20. Snímek intermetalické fáze u pájky SN100C po přetavením laserem



Příloha A21. Snímek intermetalické fáze u pájky SN100C po přetavením v in-line peci

